

**DESEMPEÑO DE UN CONCRETO HIDRÁULICO ADICIONADO CON VIDRIO  
MOLIDO RECICLADO Y EAFS.**

**LIZETH CAROLINA ALONSO MORENO  
JONATHAN ALEXANDER PUERTO PORRAS**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS  
TUNJA  
2018**

**DESEMPEÑO DE UN CONCRETO HIDRÁULICO ADICIONADO CON VIDRIO  
MOLIDO RECICLADO Y EAFS.**

**LIZETH CAROLINA ALONSO MORENO  
JONATHAN ALEXANDER PUERTO PORRAS**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO DE TRANSPORTE Y VÍAS**

**Director.  
EMERSON RODRIGO RODRÍGUEZ MORENO  
Ing. Civil – Esp. Estructuras**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS  
TUNJA  
2018**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

**Tunja, Abril de 2018.**

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto no responde por las opiniones expresadas en éste proyecto de investigación.

“Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen”

## **DEDICATORIA**

En primera instancia y sin lugar a duda a Dios y a la virgen por haberme dado la oportunidad de estudiar y culminar esta carrera, por todas y cada una de las bendiciones que me dan día a día que hoy me permiten culminar mi carrera.

A mi mayor inspiración mi madre María Concepción Moreno Hernández y mi padre Gregorio Alonso Cañon, quienes durante todo el transcurso de mi vida y en especial de este proyecto estuvieron siempre para alentarme con su amor incondicional de padres, por su apoyo, animo, ayuda y consejos en cada dificultad.

A mis hermanos Jhon, Javier, Sandra y Fernando porque gracias a su ejemplo aprendí la importancia de ser perseverante para cumplir las metas propuestas y alcanzar grandes logros en la vida, gracias a su apoyo y por ser mi motivación para cumplir hoy con este logro.

A mi novio Beyer Osorio, por ser ese respaldo y apoyo incondicional para que mis días durante el transcurso de esta carrera fueran mejores y más llevaderos, porque gracias a su amor, dedicación, esfuerzo, paciencia, ejemplo y por confiar en mis capacidades hoy logro culminar este proyecto.

A mis amigos y compañeros de carrera los ingenieros Johana Largo, Manuel Jiménez, Julia Bolívar, Leidy Tovar, Marcela Cáceres, Liliana Sainea, Ingrid Sosa, Angie Barrios, Nidia Vargas, Angie Sisa, Lina Alba, Elizabeth Porras, Natalia Zamora, Yessenia Arenas, por haberme acogido y permitido aprender de la vida al lado de ellos, gracias por todos sus consejos, animo, paciencia, cariño, alegría y todos esos buenos momentos compartidos, estar aquí es también gracias a ellos.

A mi grandes y queridas amigas las Docentes Liana Díaz, Ximena Casas, Milena Casallas y Yuliana Muñoz, por ser siempre incondicionales con migo y apoyarme en esta carrera que decidí escoger.

A mi compañero de trabajo de grado Jonathan Alexander Puerto Porras, con quien logramos trabajar y culminar este proyecto a pesar de las dificultades, puesto que es una persona perseverante de la cual aprendí a no rendirme ante una eventualidad.

**LIZETH CAROLINA ALONSO MORENO**

## **DEDICATORIA**

A Dios y la virgen por darme la oportunidad de culminar otro logro más en mi vida, por todas bendiciones con las que me cobija a diario y las oportunidades venideras.

A mi padre Armando Puerto González quien me enseñó la tenacidad con la cual se debe afrontar los retos y obstáculos que se presentan para seguir adelante, por el apoyo y dedicación que me ha ofrecido durante toda la vida, para lograr culminar mis metas y por su esfuerzo para brindarme un mejor futuro.

A mi madre Nubia Stella Porras Moreno que con su apoyo incondicional, por su entrega y su amor de madre ha hecho de mí una persona perseverante y apasionada por lo que hace, por brindarme la motivación necesaria para lograr mis objetivos y proyectos, por su dedicación y esfuerzo para ofrecerme una mejor vida.

A mi hermana Laura Daniela Puerto Porras quien me ha colaborado en los momentos que he necesitado por el apoyo y dedicación que me ha brindado para culminar con esta meta.

A mi prometida Ayda Rocio Buitrago Rodriguez que con su amor, paciencia, dedicación, apoyo incondicional por ser mi complemento y compañera de vida, me ha fortalecido en los momentos más difíciles, me ha hecho crecer cada día como persona y sé que con su presencia en mi vida, será una inspiración para alcanzar mis metas; a Cesar David por brindarme su ternura y cariño y ser el motor que me impulsa para ser un buen ejemplo de vida.

A mi familia que ha estado presente para apoyarme en todo momento, a mi primo Carlos Andrés Porras por darme la mano y aconsejarme cuando lo he necesitado.

A mis compañeros de carrera y ahora colegas Jahir Rubio y Juan Rodriguez que con su apoyo y compañerismo hicieron de la universidad un espacio lleno de aprendizaje, emprendimiento y fortalecimiento personal.

A mi compañera de trabajo de grado Carolina Alonso por haber afrontado con migo el reto de realizar y culminar esta investigación que pese a los obstáculos y adversidades que se presentaron en el camino, se pudo completar.

**JONATHAN ALEXANDER PUERTO PORRAS**

## **AGRADECIMIENTOS**

Inicialmente expresamos nuestro agradecimiento a quien ha forjado durante nuestras vidas un camino correcto, Dios, por brindarnos fortaleza, sabiduría, perseverancia para cumplir cada meta que nos planteamos.

A nuestro director de investigación, ingeniero Emerson Rodrigo Rodríguez, por confiar en nuestras facultades, conocimientos y asumir este reto junto con nosotros, por guiarnos, orientarnos y ofrecernos las herramientas necesarias para poder continuar y culminar este proyecto.

Al ingeniero Manuel Sierra Arciniegas, quien siempre mostró su buena disposición para cada uno de los ensayos en el laboratorio de pavimentos, de igual forma al ingeniero Edwin Suarez, analista del laboratorio de los Hermanos López, quien siempre nos ayudó y asesoró cuando se requería, además agradecer a todo el cuerpo de ingenieros y auxiliares quienes nos asesoraron en el desarrollo de los ensayos.

Por último, pero no menos importante, agradecer a nuestras familias, amigos y compañeros de carrera por el apoyo, acompañamiento incondicional y ánimo que nos brindaron durante el largo transcurso de nuestra carrera y de esta etapa, que hoy nos convierte en ingenieros en transporte y vías.

**LIZETH CAROLINA ALONSO MORENO  
JONATHAN ALEXANDER PUERTO PORRAS**

## RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es realizar el procedimiento para analizar y evaluar el desempeño de una mezcla de un concreto hidráulico adicionado con vidrio molido reciclado PVR y escoria de horno de arco eléctrico EAFS.

Teniendo en cuenta la normatividad vigente, las especificaciones y normas del Instituto Nacional de Vías, INVIAS del año 2013, se van a evaluar las propiedades mecánicas de los materiales especificados, mediante cuatro tipos de mezclas:

- Mezcla 1, comprendida por agregados convencionales grueso, fino, cemento y agua.
- Una mezcla 2, con un 50% de grava, 50% de escoria EAFS, 20% de polvo de vidrio reciclado, 80% de arena, cemento y agua.
- Mezcla 3, con un 50% de grava, 50% de escoria EAFS 30% de polvo de vidrio reciclado, 70% de arena, cementó y agua.
- Finalmente una mezcla 4, con un 50% de grava, 50% de escoria EAFS, 40% de polvo de vidrio reciclado, 60% de arena, cementó y agua.

Para hacer el diseño de las mezclas anteriores se empleó la metodología ACI 211, la cual ha desarrollado un procedimiento de diseño de mezcla, basándose en una serie de tablas que permiten obtener valores de los diferentes materiales que integran la unidad cúbica del concreto. El procedimiento para la selección de las proporciones que se presentan es aplicable a concretos de peso normal y a las condiciones que para cada una de las tablas se indican en ellas, determinando la fórmula de trabajo como base de un diseño patrón, el cual permite analizar propiedades como trabajabilidad, manejabilidad, asentamiento, resistencia a la compresión y flexión.

Los resultados obtenidos de todo el proceso de ensayo conducen a la posibilidad de sustituir los agregados pétreos convencionales en una mezcla de concreto hidráulico normal por agregados artificiales(EAFS y polvo de vidrio reciclado), ya que los resultados obtenidos muestran características físicas y mecánicas muy semejantes a las aportadas por agregados pétreos, observando que los resultados arrojados por la mezcla con un 50% de grava, 50% de EAFS, 40% de polvo de vidrio reciclado, 60% de arena, cemento y agua, muestran un mejor comportamiento de resistencia a la compresión a una edad de 28 días, al igual que en el ensayo de flexotracción de vigas a 7 y 28 días, soportando la factibilidad de sustituir los agregados pétreos por materiales artificiales.



## CONTENIDO

	pág
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
2. MARCO CONCEPTUAL .....	21
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	21
2.2 ANTECEDENTES DEL VIDRIO .....	21
2.2.1 Cajamarca Perú. Universidad Nacional de Cajamarca. Facultad de Ingeniería. Escuela académico profesional de ingeniería civil.....	22
2.2.2 Quito, (Ecuador). Escuela Politécnica Nacional.....	23
2.2.3 Córdoba (Argentina). UNC Argentina .....	23
2.2.4 Universidad de Michigan Estados Unidos .....	24
2.3 ANTECEDENTES DE LA ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EAFS.....	24
2.3.1 Cali (Colombia), Universidad del Valle.....	25
2.3.2 Bogotá (Colombia). Universidad de la Salle 2010 .....	25
2.3.3 Quito (Ecuador). Escuela politécnica nacional .....	26
2.3.4 Barcelona (España) Universidad politécnica de Cataluña, 2009.....	26
2.3.5 Bogotá (Colombia). Universidad Nacional 2010. ....	27
2.4 BASES TEÓRICAS .....	27
2.4.1 Concreto .....	27
2.4.2 Agua y cemento. ....	28
2.4.3 Agregados .....	28
2.4.4 Gravas .....	28
2.4.5 Arenas.....	28

2.4.6 Cemento .....	29
2.4.7 Agua .....	29
2.5 TIPOS DE CONCRETOS .....	29
2.5.1 Concreto simple.....	29
2.5.2 Concreto reforzado.....	30
2.6 PROPIEDADES DEL CONCRETO .....	30
2.6.1 Trabajabilidad .....	30
2.6.2 Consistencia .....	31
2.6.3 Durabilidad .....	32
2.6.4 Impermeabilidad del concreto .....	33
2.6.5 Densidad .....	33
2.6.6 Segregación .....	33
2.6.7 Exudación .....	33
2.6.8 Resistencia al fuego .....	34
2.7 CARACTERÍSTICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN DEL CONCRETO .....	34
2.7.1 Resistencia a la compresión $f'_c$ .....	35
2.7.2 Módulo de elasticidad. ....	35
2.8 ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EAFS.....	37
2.9 VIDRIO Y POLVO DE VIDRIO.....	38
2.9.1 Composición química del vidrio .....	39
2.10 MÉTODO A.C.I 211.....	41
3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES .....	43
3.1 ADQUISICIÓN DE LOS MATERIALES .....	43
3.1.1 Agregado grueso.....	43
3.1.2 Agregado fino .....	44
3.1.3 Escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS). ....	44

3.1.4 Polvo de vidrio.....	45
3.1.3 Cemento .....	45
3.2 TIPOS DE ENSAYOS Y NORMAS .....	45
3.2.1 Propiedades Agregado Grueso (Grava y EAFS).....	45
3.2.2 Desgaste en máquina de los Ángeles.....	46
3.2.3 Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval.....	46
3.2.4 Resistencia mecánica por el método del 10% de finos.....	47
3.2.5 Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfatos .....	48
3.2.6 Terrones de arcilla y partículas deleznales.....	48
3.2.7 Partículas fracturadas mecánicamente (una cara) .....	49
3.2.8 Partículas planas y alargadas.....	49
3.2.9 Gravedad específica y absorción.....	50
3.2.10 Granulometría .....	51
3.3 Propiedades agregado fino (arena y polvo de vidrio reciclado PVR).....	54
3.3.1 Pérdida en el ensayo de solidez en sulfatos.....	54
3.3.2 Índice de plasticidad .....	55
3.3.3 Equivalente de arena .....	55
3.3.4 Material que pasa el tamiz N°200 .....	56
3.3.5 Absorción de agregado fino .....	56
3.3.6 Granulometría. ....	58
3.3.7 Módulo de Finura. ....	61
2.4 RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS Y CUMPLIMIENTO SEGÚN ESPECIFICACIONES INVIAS 2013 .....	61
4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	65
DISEÑO DE LA MEZCLA .....	65
4.2. ELABORACIÓN DE CILINDROS Y VIGAS DE CONCRETO .....	75

5. RESULTADOS OBTENIDOS.....	80
5.1 RESULTADOS OBTENIDOS .....	82
5.1.1 Mezcla 50% de escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS) y 20% vidrio.....	83
5.1.2 Mezcla 50% de escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS) y 30% vidrio.....	84
5.1.3 Mezcla 50% de escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS) y 40% vidrio.....	85
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
6.1 INCIDENCIA DE LA EAFS Y PORCENTAJES DE VIDRIO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7 Y 28 DÍAS.....	87
6.2 INCIDENCIA DE LA EAFS Y PORCENTAJES DE VIDRIO EN LA RESISTENCIA A FLEXIÓN A 7 Y 28 DÍAS.....	89
6.3 DENSIDAD EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO .....	93
6.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON BASE EN EL PORCENTAJE ESTIMADO .....	93
6.5 FISURAS EN LAS PROBETAS.....	94
6.6 MÓDULO DE ROTURA.....	95
6.7 MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	100
6.8 CARTAS DE DISEÑO .....	103
7. CONCLUSIONES .....	104
8. RECOMENDACIONES.....	107
9. BIBLIOGRAFÍA.....	109

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.Concreto simple.....	29
Figura 2.Concreto reforzado .....	30
Figura 3.Medición del Slump.....	31
Figura 4.Curva esfuerzo Deformación .....	37
Figura 5.Composición química del vidrio .....	40
Figura 6.Agreto grueso grava .....	43
Figura 7.Agregado fino arena .....	44
Figura 8.Agregado grueso EAFS.....	44
Figura 9. Agregado fino vidrio .....	45
Figura 10.Máquina de los Ángeles.....	46
Figura 11. Equipo Micro – Deval.....	47
Figura 12.Resistencia mecánica por el método de 10% de finos. ....	47
Figura 13.Ensayo Partículas planas y alargadas. ....	49
Figura 14.Curva granulométrica agregado grueso-grava. ....	53
Figura 15.Curva granulométrica agregado grueso-EAFS.....	54
Figura 16. Ensayo equivalente de arena.....	55
Figura 17.Ensayo densidad y absorción de agregado fino.....	56
Figura 18.Curva granulométrica agregado fino arena. ....	59
Figura 19.Curva granulométrica agregado fino polvo de vidrio reciclado al salir de la máquina de los Ángeles.....	60
Figura 20 .Valores de asentamiento para un pavimento de concreto.....	66
Figura 21. Equipos y moldes.....	76
Figura 22. Lavado, trituración y tamizado del vidrio .....	76
Figura 23. Ensayo de asentamiento (Slump) .....	77
Figura 24. Moldes aceitados.....	77
Figura 25. Viga lista para ser enrazada .....	78
Figura 26. Inmersión de los Especímenes en agua .....	78
Figura 27. Vigas y cilindros elaborados .....	79
Figura 28. f'c Vs porcentaje de Vidrio.....	87

Figura 29. Resistencia a compresión Vs edad a 7 y 28 días .....	88
Figura 30. Flexión vs el tiempo en días.....	92
Figura 31. Resistencia a compresión Vs tiempo .....	92
Figura 32. Tipos de fractura típicos a compresión.....	94
Figura 33. Módulo de Rotura Vs tiempo.....	97
Figura 34. Módulo de rotura y compresión del concreto.....	98
Figura 35. Criterios de diseño para la mezcla de concreto en pavimentos de concreto hidráulico. ....	99
Figura 36. Curva esfuerzo deformación mezcla patrón .....	100
Figura 37. Curva esfuerzo deformación mezcla 70% arena, 30% polvo de vidrio, 50% grava y 50% EAFS. ....	102

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores de asentamiento recomendados para diversos tipos de construcción, sistemas de colocación y compactación. ....	32
Tabla 2. Composición química del vidrio. ....	41
Tabla 3. Resultados desgaste máquina de los Ángeles agregado grueso. ....	46
Tabla 4. Resultados desgaste equipo Micro-deval agregado grueso. ....	47
Tabla 5. Resultados desgaste por el método 10% de finos agregado grueso. ....	48
Tabla 6. Resultados ensayo de solidez agregado grueso. ....	48
Tabla 7. Resultados ensayo Porcentaje de arcilla y partículas deleznales agregado grueso. ....	48
Tabla 8. Resultados ensayo Porcentaje de arcilla y partículas deleznales agregado grueso. ....	49
Tabla 9. Resultados ensayo Partículas largas y aplanadas agregado grueso. ....	50
Tabla 10. Resultados obtenidos gravedad específica y absorción grava. ....	50
Tabla 11. Resultados obtenidos gravedad específica y absorción EAFS. ....	51
Tabla 12. Resultados obtenidos gravedad específica y absorción Combinación 50% grava-50%EAFS. ....	51
Tabla 13. Datos obtenidos para el agregado grueso grava. ....	52
Tabla 14. Valores obtenidos para agregado grueso EASF. ....	53
Tabla 15. Resultado equivalente de arena. ....	55
Tabla 16. Resultados gravedad específica y absorción arena. ....	57
Tabla 17. Resultados gravedad específica y absorción polvo de vidrio reciclado. ....	57
Tabla 18. Resultados gravedad específica y absorción 80% arena-20% vidrio. ....	57
Tabla 19. Resultados gravedad específica y absorción 70% arena-30% vidrio. ....	58
Tabla 20. Resultados gravedad específica y absorción 60% arena-40% vidrio. ....	58
Tabla 21. Valores obtenidos para agregado fino arena. ....	59
Tabla 22. Valores obtenidos para agregado fino polvo de vidrio reciclado al salir de la máquina de los Ángeles. ....	60
Tabla 23. Caracterización agregado grueso grava. ....	61
Tabla 24. Caracterización agregado grueso-EAFS. ....	62
Tabla 25. Caracterización agregado fino arena. ....	63

Tabla 26. Caracterización agregado fino vidrio .....	64
Tabla 27. Cantidad aproximada de aire en concreto con aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado. ....	67
Tabla 28. Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, en concreto sin aire incluido. ....	68
Tabla 29. Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar. ....	68
Tabla 30. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, Portland tipo I, en concretos sin aire incluido. ....	69
Tabla 31. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.....	70
Tabla 32. Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón.....	71
Tabla 33. Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón.....	71
Tabla 34. Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón corrección por humedad..	73
Tabla 35. Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón corrección por resistencia. ....	74
Tabla 36. Porcentaje de sustitución de agregados pétreos por agregados artificiales. ....	74
Tabla 37. Resumen cantidades mezcla 1 (20% vidrio, 80% de arena).....	75
Tabla 38. Resumen cantidades mezcla 2 (30% vidrio, 70% de arena).....	75
Tabla 39. Resumen cantidades mezcla 3 (40% vidrio, 60% de arena).....	75
Tabla 40. Resumen cantidades mezcla patrón. ....	80
Tabla 41. Resumen cantidades mezcla 1 (20% vidrio, 80% de arena).....	80
Tabla 42. Resumen cantidades mezcla 2 (30% vidrio, 70% de arena).....	81
Tabla 43. Resumen cantidades mezcla 3 (40% vidrio, 60% de arena).....	81
Tabla 44. Resumen cantidades para la mezcla patrón .....	81
Tabla 45. Resumen cantidades para la mezcla 1 (20% vidrio, 80% de arena).....	82
Tabla 46. Resumen cantidades para la mezcla 2 (30% vidrio, 70% de arena).....	82
Tabla 47. Resumen cantidades mezcla 3 (40% vidrio, 60% de arena).....	82
Tabla 48. Resultados de módulo de rotura para Diseño Patrón.....	83
Tabla 49. Resultados de Compresión para el diseño patrón.....	83
Tabla 50. Resultados de módulo de rotura para la mezcla de 20 % de vidrio molido .....	84
Tabla 51. Resultados a compresión para la mezcla de 20 % de vidrio molido .....	84
Tabla 52. Resultados de módulo de rotura para la mezcla de 30 % de vidrio molido .....	85



Tabla 53. Resultados a compresión de la mezcla de 30% de vidrio molido .....	85
Tabla 54. Resultados de módulo de rotura para la mezcla de 40 % de vidrio molido .....	86
Tabla 55. Resultados a compresión de la mezcla de 40% de vidrio molido .....	86
Tabla 56. Variación de la resistencia a la compresión, $f'_c$ con base en el porcentaje de EASF y vidrio molido. ....	87
Tabla 57. Cálculo del esfuerzo flexionante.....	91
Tabla 58. Cuadro resumen de las densidades del concreto.....	93
Tabla 59. Porcentaje de la resistencia a compresión .....	94
Tabla 60. Tipos de fisuras.....	95
Tabla 61. Módulo de rotura para 7 días. ....	95
Tabla 62. Módulo de rotura para 28 días .....	96
Tabla 63. Módulo de Rotura .....	97
Tabla 64. Cuadro resumen de valores a flexión comparados con la norma INVIAS.....	99

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en el diseño de construcciones se hace especial énfasis en las especificaciones de los materiales con los que se van a construir las estructuras. En el caso de estructuras en concreto reforzado se especifica la resistencia del concreto y del acero, pero para el concreto, en la obra se hace difícil determinar la calidad de la mezcla en el momento de su aplicación, y se confía la resistencia final del concreto a los cálculos realizados en el diseño de mezclas, luego se comprueba la resistencia alcanzada mediante ensayos de resistencia a la compresión a probetas hechas a partir del concreto con el que se construyeron las estructuras.

Por otra parte, en el sector de la construcción el concreto es el material más usado en todo el mundo y la demanda en su producción también va en aumento, lo que implica la explotación y utilización de productos naturales para la realización de los mismos, como por ejemplo las arenas utilizadas como agregado fino. En el proceso para la producción del cemento se requiere energía (muchas veces de fuentes no renovables) lo que genera la emisión de gases que de no ser tratados contribuyen al aumento del efecto invernadero. Por lo que este sector busca continuamente oportunidades de mejora y por ello se ha empezado a estudiar el uso de materiales alternativos en las mezclas, entre los que se incluye los residuos de vidrio y la utilización de escorias de horno de arco eléctrico.

La escoria negra de horno de arco eléctrico EAFS, es un desecho industrial proveniente de producción de acero. La escoria negra de horno de arco eléctrico afecta el medio ambiente, específicamente modificando y alterando las propiedades del suelo, generando un ambiente no sostenible con impactos negativos al entorno. A nivel nacional, no existe mucha información con respecto al uso de escoria y polvo de vidrio reciclado en la elaboración de concretos, es por esta razón que se hace importante y relevante el presente proyecto, pues se hace un análisis de las propiedades mecánicas de estos materiales alternativos, para que hagan parte de los agregados del concreto en comparación con materiales convencionales de las canteras naturales presentes en el departamento de Boyacá.

Por otra parte, la utilización de vidrio en el sector urbano ha venido aumentando con el transcurso del tiempo y proporcionalmente incremento los residuos de estos. El vidrio termina en rellenos sanitarios, generando un gran impacto al medio ambiente ya que no se tiene algún tipo de control en su disposición óptima. Debido a este problema se propone evaluar la reutilización de los residuos del vidrio como sustituto parcial del agregado fino para la realización de concreto.

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo ensayar materiales convencionales y no convencionales para la fabricación de un concreto hidráulico adicionado con polvo de vidrio molido reciclado y EAFS, que cumpla con las especificaciones del INVIAS-2013 y las normas NTC, para un nivel de tránsito 1 (NT1), especificado para vías en las que el tránsito de diseño de las obras por

construir es superior a  $5.0 \times 10^6$  ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño. La importancia radica en que materiales de desecho industrial pueden reemplazar parte de los materiales pétreos en la fabricación de concretos de alta calidad.

Se utiliza la metodología ACI 211 para el diseño de la mezcla y determinación de la fórmula de trabajo, como base de un diseño patrón, el cual permite analizar propiedades como trabajabilidad, manejabilidad, durabilidad, entre otros, para su utilización en la construcción de vías.

El primer capítulo del libro comprende un marco conceptual y estado del arte, con conceptos básicos que se deben tener en cuenta para la comprensión de los temas tratados, es decir, es un preámbulo a las temáticas que se van a tratar a lo largo del documento; además contextualiza la investigación, dando una mirada a los proyectos y avances desarrollados a nivel regional, nacional e internacional con el objetivo de tener en cuenta los errores y aportes que se han desarrollado referentes al tema.

El segundo capítulo, denominado caracterización de materiales, identifica el origen de los materiales, es decir, las canteras y empresas en las cuales se adquirió el material a ensayar. Además de los ensayos normalizados por el INVIAS para la versión 2013.

En el tercer y cuarto capítulo, se explica el diseño experimental, el manejo y la adecuación de los materiales alternativos empleados en la investigación, al igual que la determinación de la dosificación del diseño a emplear.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos de resistencia y módulo de rotura de los especímenes ensayados.

El capítulo cinco incluye el análisis de las propiedades mecánicas de los materiales y su comportamiento al interior de las mezclas de concreto.

Por último, se presentan conclusiones, recomendaciones y un análisis de los impactos económicos, sociales, ambientales y aportes que puede llegar a generar el proceso de investigación plasmado en el presente documento para la región y a nivel general.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar el comportamiento de una mezcla de concreto hidráulico convencional remplazando el agregado grueso por Escoria Negra de Horno de arco eléctrico (EAFS), y el agregado fino por polvo de vidrio reciclado PVR.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Exponer las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes agregados para la mezcla de concreto hidráulica convencional, mediante los ensayos recomendados según las especificaciones INVIAS.
- Elaborar una mezcla de concreto hidráulico al cual se le remplazara el agregado grueso por escoria de horno eléctrico en un 50% y el agregado fino por polvo de vidrio en porcentajes del 20, 30 y 40%, con el fin de reanalizar una comparación de sus características con un concreto convencional.
- Medir la resistencia a la compresión simple del concreto hidráulico modificado por medio del ensayo I.N.V.E-410. Resistencia a la Compresión de cilindros de concreto.
- Evaluar el asentamiento de la mezcla de concreto hidráulico modificado mediante la norma I.N.V.E-404. Asentamiento del concreto de cemento Hidráulico (SLUMP)
- Estimar el módulo de elasticidad del concreto modificado haciendo uso de la curva esfuerzo deformación característica de este.
- Diseñar una carta de diseño para pavimentos rígidos a partir de los resultados y análisis obtenidos de la experimentación, para una posible utilización en el entorno de la construcción de pavimentos rígido.

## **2. MARCO CONCEPTUAL**

Las actuales exigencias de diseño de los concretos hidráulicos y de los materiales que lo componen, obligan al ingeniero de Transporte y Vías a indagar permanentemente sobre el comportamiento y características de los materiales de construcción, de tal manera que dichos parámetros le permitan modelar y evaluar con un alto grado de precisión el comportamiento de la estructura ante cada una de las solicitaciones demandadas. Considerando el concreto como el principal material de construcción y cuya evolución ha requerido mucho tiempo, se hace necesario caracterizarlo eficientemente a fin de conocer a profundidad sus propiedades físicas y mecánicas para su aplicación como elemento estructural.

En los últimos años con el aumento y desarrollo de las industrias siderúrgicas en el departamento y la generación de residuos sólidos urbanos como lo es el caso del vidrio en presentación de botellas, se hace necesario aplicar un proceso de reutilización de estos residuos con el fin de darles un uso como materiales alternativos en la elaboración y producción de concretos, esto debido a las ventajas tanto a nivel productivo como ambiental de estas contribuyendo a la disminución de la contaminación ambiental en el manejo y aprovechamiento de este tipo de residuos.

### **2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN**

Para el desarrollo de la presente investigación, ha sido necesario realizar una profunda revisión de investigaciones previas relacionadas con el tema, específicamente en concreto con y sin adición de materiales alternativos como sustituyentes de los agregados tradicionales, como lo es el caso de las fibras o polvo de vidrio reciclado y la escoria de horno de arco eléctrico EAFS, como antecedentes relevantes en cuanto al tipo de investigación, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, la metodología empleada para las mediciones, las conclusiones y los autores con los cuales se construyeron sus bases teóricas.

### **2.2 ANTECEDENTES DEL VIDRIO**

La utilización de botellas de vidrio ha venido en aumentando en la parte urbana de la población, y en consecuencia sus residuos, los cuales muchas veces quedan expuestos en rellenos sanitarios lo que produce contaminación y acumulación de estos residuos en los centros urbanos, debido a esto es importante investigar la reutilización de estos residuos como material alternativo en la fabricación de concreto hidráulico, investigándose como un material sustituyente del agregado fino convencional. De esta manera se puede evidenciar el estudio de este tema en trabajos como: “El Vidrio molido entra en una reacción beneficiosa con los hidratos

del cemento, así que básicamente la química del cemento se mejora con el vidrio"(Parvis Soroushian. 2012), como se ha visto la utilización del vidrio<sup>1</sup> reduce en más o menos un 20 por ciento la cantidad de cemento.

Según algunas investigaciones, el vidrio puede tener propiedades ópticas, mecánicas y térmicas muy diversas según su composición química y tratamientos térmicos. En general, el vidrio se caracteriza por ser un material duro, frágil, transparente y resistente a la corrosión, el desgaste y la compresión<sup>2</sup>. Al reutilizar el vidrio se mejoran las propiedades mecánicas del hormigón, además disminuye el uso de grandes cantidades de cemento en la construcción, minimizando costos y a la vez ayudando al medio ambiente con la disminución de las emisiones CO<sup>2</sup> producidas para fabricarlo.<sup>3</sup>

El vidrio posee algunas características que lo hacen muy útil para la fabricación de distintos objetos como botellas, frascos y vasos. La resistencia de los envases de vidrio es realmente sorprendente en algunos casos, está determinada por los siguientes puntos: forma del envase, distribución de vidrio y grado de recocido. Al tener algún defecto en su resistencia, pueden ocurrir distintos tipos de fractura: por impacto, por choque térmico o por presión internas. De esta manera el vidrio posee una alta resistencia a compresión, estimándose en el orden de 10.000 Kg/cm<sup>2</sup>.<sup>4</sup>

### **2.2.1 Cajamarca Perú. Universidad Nacional de Cajamarca. Facultad de Ingeniería. Escuela académico profesional de ingeniería civil**

Catalán (2013), estudió la influencia del vidrio molido en las mezclas de hormigón al reemplazar agregado fino por vidrio molido y como resultados muestran que el hormigón con adición de vidrio, mantiene prácticamente inalterable sus propiedades, tanto en estado fresco como endurecido, observándose un ligero aumento en la resistencia de las mezclas con un 10% de agregado de vidrio.<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup> CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA. Tipos de concreto con vidrio molido, [en línea]. Michigan, EEUU. Diciembre 2012.

<sup>2</sup> Poveda Ricardo. Técnico Docente del Departamento de Ingeniería Mecánica de la EPN, Quito, Ecuador.

<sup>3</sup> Garcés, Juan, Flores de la Rosa Vanessa, Huamán, Freddy. Estudio del polvo de vidrio obtenido de la molienda de botellas recicladas en la provincia de santa Elena como sustituto parcial del cemento en el hormigón. Ecuador, La libertad .2016 .pág. 3.

<sup>4</sup> Castillo Pazmiño, Marcelo ING. CIVIL – MSc. INGENIERÍA AMBIENTAL. INVESTIGACIÓN DE LA UTILIZACIÓN DEL VIDRIO MOLIDO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN Y TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS.21 de Junio de 2010

<sup>5</sup> BACHILLER: TEJADA ROMERO, GUILLERMO. EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AL REEMPLAZAR PORCENTUALMENTE CEMENTO POR VIDRIO MOLIDO LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN.2014

### **2.2.2 Quito, (Ecuador). Escuela Politécnica Nacional**

En Quito se realizó un análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A en el cual se estableció que la granulometría del vidrio fino es la más adecuada para ser usada como material sustituyente de la arena, debido a que esta se ajusta a los intervalos de la curva granulométrica; esto debido ciertas propiedades del vidrio que hacen del mismo un buen agregado para adoquines de hormigón, entre las cuales se menciona: baja corrosión química, lo cual contribuiría en caso de estar sometido a condiciones ambientales extremas como la lluvia ácida, su composición química similar a la de la arena, por tanto es resistente a la degradación con una elevada dureza y resistencia al desgaste<sup>6</sup>. Por ende, la utilización del vidrio ayuda a disminuir la alteración producida al medio ambiente producto de material primas como la arena y la cal entre otras.

Otro proyecto experimental hecho en Ecuador (Ambato) analiza la resistencia a la compresión del hormigón usando el vidrio molido reciclado, en el cual se obtuvieron resultados satisfactorios con su uso ya que su granulometría se ajusta a lo estipulado en las especificaciones del país, llegando a la misma conclusión de fuentes anteriormente consultadas en la cual el aumento del porcentaje de vidrio que reemplaza a la arena en la mezcla puede permitir disminuir la cantidad de cemento a emplear, debido a que el vidrio al tener mayor tamaño de partícula, su superficie específica disminuye requiriendo menor cantidad de cemento para cubrirla.<sup>7</sup>

### **2.2.3 Córdoba (Argentina). UNC Argentina**

En Córdoba Argentina en el Departamento de Estructuras Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC, se realizó un estudio a cargo del profesor asociado M. Ruiz, Rodríguez, en el cual se estudió el comportamiento de mezclas de hormigón en las cuales se reemplaza un porcentaje del cemento por vidrio finamente molido. En estudios realizados en otros países se ha encontrado que este tipo de mezcla da buenos resultados como consecuencia de reacciones puzolánicas que ocurren entre las micro partículas de vidrio y la cal liberada en la hidratación primaria del cemento, generando compuestos CSH secundarios. Otro hecho

---

<sup>6</sup> POVEDA, Ricardo. análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A. Ecuador.Quito.2015

<sup>7</sup> PEÑAFIEL, DANIELA. análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino. Ecuador.Ambato.2016

asociado al uso del vidrio en el concreto es el ahorro de una tonelada de recursos naturales designados a la elaboración del concreto por tonelada de vidrio a utilizar generando grandes beneficios socio-económicos<sup>8</sup>.

#### **2.2.4 Universidad de Michigan Estados Unidos**

Se han realizado varias investigaciones en la Universidad de Michigan en Estados Unidos sobre la calidad de hormigón cuando en su composición se adiciona vidrio molido pulverizado en tamaño promedio de 13µm, se investigó en cuanto a su resistencia mecánica, resistencia ante la presencia de agua y durabilidad, empleando para cada proceso las normas ASTM. El porcentaje de vidrio empleado va desde el 15 al 23%, cuyos resultados han sido considerablemente positivos, obteniéndose un hormigón compatible con el de composición normal. Los resultados demuestran que la adición de vidrio mejora la absorción de humedad y la resistencia dando mayor durabilidad. Otra característica mejorada ha sido la resistencia a la abrasión y resistencia a largo plazo con un contenido de 20% de vidrio pulverizado, comprobado con el ensayo de muestras de pavimentos y bordillos, ejecutados con procesos convencionales y controlados durante dos años.<sup>9</sup>

### **2.3 ANTECEDENTES DE LA ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EAFS**

Los desechos sólidos de las industrias metalúrgicas, denominados escoria, se han convertido en agregados para mezclas de concreto con nuevas propiedades y usos. La escoria de horno de arco eléctrico es un producto obtenido del arrabio, en cantidades proporcionales a la producción. Los constituyentes son similares a los del Clinker, pero en proporciones aleatorias como consecuencia de los materiales con que se carga el horno para la obtención del metal.

Es interesante considerar la aplicación de la escoria en la elaboración del concreto desde tres aspectos importantes: tecnológico (mejora propiedades del cemento y del concreto), ambiental (menor contaminación), y económico (ahorro de combustible no renovable, y aumento de la capacidad de fabricación de cemento).

---

<sup>8</sup> Garcés, Juan, Flores de la Rosa Vanessa, Huamán, Freddy. Estudio del polvo de vidrio obtenido de la molienda de botellas recicladas en la provincia de santa Elena como sustituto parcial del cemento en el hormigón. Ecuador, La libertad.

<sup>9</sup> PEÑAFIEL CARRILLO, Daniela Alejandra. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN AL EMPLEAR VIDRIO RECICLADO MOLIDO EN REEMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO. Universidad Técnica de Ambato Ecuador 2016



De esta manera en cuanto a los antecedentes sobre el uso de escoria de horno de arco eléctrico EAFS usada como adición en el concreto convencional es posible mencionar los siguientes autores:

### **2.3.1 Cali (Colombia), Universidad del Valle.**

Jherson E. Díaz y otros en su artículo Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: resistencia mecánica y durabilidad, estudia el efecto en las propiedades de desempeño de un cemento portland cuando se incorpora adición de caliza (hasta 20%) y escoria siderúrgica de alto horno (hasta 30%), para generar una mezcla ternaria. Las propiedades evaluadas fueron resistencia a la compresión, absorción y porosidad, succión capilar, permeabilidad a cloruros, y resistencia química de los morteros expuestos a sulfatos. Los resultados indican que la resistencia mecánica a compresión de los cementos ternarios es hasta un 35% superior con relación al mortero de referencia y a su vez presentan menores coeficientes de succión capilar, confirmando la acción tanto de carácter físico como químico de los materiales de adición. Respecto a la resistencia al ataque por sulfatos el mejor comportamiento lo presentó la mezcla con menor porcentaje de caliza, en este caso se determinaron los productos de reacción formados utilizando difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

### **2.3.2 Bogotá (Colombia). Universidad de la Salle 2010**

A nivel regional este tema de las escorias no ha sido muy explorado, por el contrario, son muy pocos los estudios de carácter investigativo que se han hecho para este material. De los pocos artículos o trabajos de grado existentes la mayoría estudian el comportamiento de la escoria de horno de arco eléctrico en concreto hidráulico. Las estudiantes Lina María Parra y Diana Pilar Sánchez en su tesis “Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica DIACO S.A municipio Tuta Boyacá”<sup>10</sup>, estudian principalmente el aprovechamiento de las escorias negras de horno de arco eléctrico como agregado en el concreto generadas por la Siderúrgica DIACO S.A, haciendo la evaluación técnica, financiera y comercial para evaluar la factibilidad de su uso.

Básicamente, se hizo el diseño de mezclas para diferentes dosificaciones de agregado para concreto de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% y se evaluó la resistencia a los 7 y 28 días. Se concluyó que utilizar escorias negras de acería en el concreto como agregado grueso, mejora considerablemente las propiedades mecánicas, ya que a diferencia del agregado convencional tiene mayor resistencia al desgaste,

---

<sup>10</sup> **PARRA ARAQUE, Lina María y SÁNCHEZ GARCÍA, Diana Pilar.** Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá. Tesis pregrado. Bogotá: Universidad De La Salle. Departamento de ingeniería Civil, 2010. 118 p.

mayor peso específico y dureza lo que da como resultado elevada resistencia a la compresión.

### **2.3.3 Quito (Ecuador). Escuela politécnica nacional**

En un estudio realizado por esta escuela se hizo énfasis en el comportamiento y efectos en las propiedades de desempeño de un cemento portland.

Cuando se incorporan bloques de hormigón con escoria, adoquines con escoria y bloques con polvo de acería<sup>11</sup>. La inclusión del material de reemplazo aumentó la resistencia a la compresión tanto en los adoquines como en los bloques de hormigón, generando una disminución de cemento con respecto a los bloques comunes, lo que conlleva a una reducción en los costos de producción. Además, el polvo de acería utilizado en pequeñas cantidades en la fabricación de bloques aumenta o mantiene su resistencia a la compresión. Se realizaron además estudios para el control ambiental de los cuales se concluye que, debido a los altos contenidos de metales pesados, no debe usarse la escoria en la fabricación de adoquines por estar estos en contacto con el suelo.

### **2.3.4 Barcelona (España) Universidad politécnica de Cataluña, 2009**

La ingeniera Luciana Amaral De Lima en asocio con la Universidad Politécnica de Cataluña realizó un estudio del comportamiento del material de acería utilizado en concretos hidráulicos como resultado de su tesis doctoral: "Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental"<sup>12</sup>. Se llevaron a cabo ensayos de caracterización de los materiales, estabilidad volumétrica y determinación de la reactividad hidráulica, utilizando la escoria como adición de morteros para la determinación de la resistencia mecánica en pastas de escoria en morteros con escoria como ligante y morteros con escoria como árido fino. Los resultados obtenidos mostraron que la escoria aporta importantes beneficios en la resistencia, obteniéndose morteros y concretos más resistentes.

Es pertinente mencionar la investigación realizada por la universidad politécnica de Cataluña a cargo de la ingeniera Luciana Amaral en su tesis doctoral describiendo el comportamiento de la escoria en concretos hidráulicos, donde se realizó una caracterización de materiales, verificando su estabilidad volumétrica y determinando su reactividad hidráulica. Por otra parte, una investigación realizada en la Universidad Politécnica de Cataluña denominada "Reactividad y expansión de las

---

<sup>11</sup> NICOLA, Sara. Utilización de escorias y polvos de acería en la producción de bloques y adoquines. Quito: Escuela Politécnica Nacional

<sup>12</sup> AMARAL DE LIMA, Luciana. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de ingeniería de la construcción, 2009. 243p.

escorias de acería de horno de arco eléctrico en relación con sus aplicaciones en la construcción” de los autores Ramonich Vázquez y M. Barra, determinó la composición química, su posible expansión al contacto con el agua y las consecuencias que generan aplicaciones en la ingeniería.<sup>13</sup>

### **2.3.5 Bogotá (Colombia). Universidad Nacional 2010.**

Debido a que en estructuras de concreto hechas con cemento Portland, la penetración del ion cloruro es la principal causa de deterioro por corrosión del refuerzo, el estudio y prevención de los mecanismos que generan corrosión en el concreto son fuentes de constante investigación. La influencia de la adición de la escoria de horno de arco eléctrico en las propiedades que gobiernan los fenómenos de transporte iónico del concreto, especialmente los del ion cloruro y las relaciones entre los coeficientes de difusión con la resistividad eléctrica y la resistencia a la compresión, fue evaluada para mezclas con diferentes porcentajes de remplazo de escoria. De la misma forma, mediante un modelo computacional y un ensayo de migración eléctrica se obtuvieron los coeficientes intrínsecos de difusión, la porosidad, la capacidad de fijación de cloruros y la concentración química de la solución de poros. Los resultados obtenidos mostraron que la escoria aporta importantes beneficios en la penetración del ion cloruro, obteniéndose un concreto menos vulnerable a la corrosión.<sup>14</sup>

## **2.4 BASES TEÓRICAS**

En el siguiente apartado se dan a conocer los conceptos de los materiales utilizados en el desarrollo del trabajo de investigación, propiedades y características del concreto.

### **2.4.1 Concreto**

Es el resultado de la mezcla de cemento portland, agregados naturales (grava y arena) y a la cual se le agrega agua para hidratar esta mezcla. El concreto se caracteriza además por ser un buen aislante acústico y resistente al fuego, por sus características de maleabilidad se pueden construir elementos de casi cualquier forma.

---

<sup>13</sup> AMARAL DE LIMA, Luciana. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de ingeniería de la construcción, 1999. 243p

<sup>14</sup> Ingeniero Civil, Especialista y Magister, Universidad Nacional de Colombia. Doctor, Coventry University, Reino Unido. Profesor asistente, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

### **2.4.2 Agua y cemento.**

El principal componente del concreto es el cemento, el cual posee las propiedades de adhesión y cohesión de las partículas que contiene la mezcla. Se utiliza cemento tipo portland. Para su hidratación la relación mínima de agua/cemento es de 0,35, siendo ésta uno de los factores que más afecta la resistencia del concreto. Por lo general el agua que se utiliza para la mezcla debe estar libre de impurezas, potable, libre de algún tipo de químico que pueda reaccionar con el cemento y afectar su resistencia.<sup>15</sup>.

### **2.4.3 Agregados**

Es el conjunto de partículas inorgánicas, de origen natural o artificial. Los agregados son la parte inerte del concreto, sin embargo, al constituir entre 65% y 75% aproximadamente del volumen total del concreto su selección es muy importante. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición, además no deben contener materiales que puedan causar deterioración del concreto<sup>16</sup>.

### **2.4.4 Gravas**

Las gravas son partículas de agregados minerales de tamaño superior a 5 mm. Son pequeñas partes de roca y se clasifican de acuerdo con su origen (canteras o cantos rodados de depósitos aluviales), granulometría, dureza, clase de roca o clasificación geológica. Las gravas trituradas poseen una mejor capacidad para trabajar entre sí que las redondas o aluviales. Varía en tamaños desde 5 mm hasta 50 mm para los concretos usados en edificaciones y puentes. Requiere buena gradación, resistencia al desgaste, durabilidad, superficies libres de impurezas<sup>17</sup>.

### **2.4.5 Arenas**

Se llama arena a las partículas cuyo tamaño está entre 0.1 y 4 mm. La arena proviene de la desintegración de las rocas y puede encontrarse en los lechos secos de ríos o en canteras. Las arenas de río son partículas redondas mientras que las de cantera son angulosas. Para producir un buen concreto debe usarse preferiblemente arena gruesa, o al menos mediana, ya que la arena fina no permite obtener buena resistencia y la arena empleada debe estar libre de impurezas, especialmente orgánicas<sup>18</sup>.

---

<sup>15</sup> Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá 1994

<sup>16</sup> UNIVERSIDAD DE PIURA, Op.cit., p. 3-4

<sup>17</sup> Sandino Pardo, Alejandro. Materiales para estructuras. Bogotá D.C., 2002

<sup>18</sup> SEQUEIRA, J. E. (1976) Temas sobre materiales de construcción. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, Cuba.

### 2.4.6 Cemento

El cemento se define como un conglomerante formado principalmente por una mezcla de caliza (carbonatos cálcicos) y arcilla (silicatos de aluminio) recibiendo el nombre de Clinker, esta mezcla luego de un debido proceso adquiere propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuadas, que al estar en contacto con el agua además tiene la propiedad de endurecer ya sea en el aire o debajo del agua, lo cual lo considerada una de las materias primas más importantes para el sector de la construcción<sup>19</sup>.

### 2.4.7 Agua

Es un elemento indispensable en la elaboración de la mezcla de concreto ya que sirve para la hidratación del cemento y el desarrollo de sus propiedades aglutinantes. Esta agua debe cumplir ciertos requisitos para que no sea perjudicial al concreto. Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga sabor u olor pronunciado se puede utilizar para la producción del concreto.

## 2.5 TIPOS DE CONCRETOS

El tipo de concreto se debe escoger dependiendo del tipo de estructura a diseñar y la función de la misma, por lo cual normalmente se clasifican en dos tipos de concreto:

### 2.5.1 Concreto simple

No contiene acero de refuerzo, se aplica en la construcción de cunetas o bordillos, andenes, obras de drenaje y sanitaria. Resiste esfuerzos a compresión, pero es débil a tracción.

**Figura 1.** Concreto simple



Fuente: tomado de todos los cómo. Disponible en <<http://todosloscomo.com/2009/03/25/como-hacer-mezcla-de-cal-y-cemento>>, citado el 2 de diciembre de 2017

---

<sup>19</sup> Delrieu Alcazar, Juan Carlos. Sanmiguel Rodríguez, Narciso. La industria del cemento en Colombia. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá 2008.

### 2.5.2 Concreto reforzado

Incluye varillas de acero de refuerzo. Está diseñado para resistir esfuerzos de compresión, tracción, cortante y torsión. Se aplica en la construcción de elementos estructurales como vigas, columnas, entrepisos, muros de corte, puentes, etc.

**Figura 2.** Concreto reforzado



Fuente: tomado de biblioteca, udep. Disponible en [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1\\_146\\_164\\_97\\_1349](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_146_164_97_1349), citado el 2 de diciembre de 2017

## 2.6 PROPIEDADES DEL CONCRETO

Debido a que todas las propiedades del concreto en estado endurecido dependen específicamente de sus características en estado fresco, específicamente en lo que se refiere a los procesos de mezclado, transporte, compactación, colocación y terminado, a continuación, se presentan las propiedades más relevantes del concreto en estado fresco, las formas de realizar su medición y los factores que las afectan.

### 2.6.1 Trabajabilidad

Propiedad del concreto en estado fresco que define la facilidad que tiene el concreto para ser mezclado, manipulado y puesto en obra, con los medios de compactación compactado y terminado sin que pierda su homogeneidad (exude o se segregue).<sup>20</sup>

El método indirecto para medir la manejabilidad de una mezcla, consiste en medir su consistencia o fluidez por medio del ensayo de asentamiento con el cono o Slump (NTC 396), esta prueba no mide la trabajabilidad del concreto, si no que determina la consistencia o fluidez de la mezcla<sup>21</sup>.

<sup>20</sup> Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 1994 Capítulo 5, concreto fresco. Pág. 111

<sup>21</sup> Rivera. Jorge. A. Tecnología del Concreto. UNICAUCA. P 83

El molde para la prueba de asentamiento con el cono o Slump es un tronco de cono de 10 cm de diámetro menor y 20 cm de diámetro mayor y 30 cm de altura.

**Figura 3.**Medición del Slump



Fuente: Archivo Fotográfico.PCA Kosmatka Diseño y control de mezclas de concreto.

### **2.6.2 Consistencia**

Se denomina consistencia a la mayor o menor facilidad que tiene el concreto fresco para deformarse o adaptarse a una forma específica. La consistencia específicamente depende de: Agua de amasado, tamaño máximo del agregado, granulometría de los agregados y la forma de los agregados, la cual influye mucho el método de compactación.

Por otra parte, la consistencia se divide en varios tipos entre los que se clasifican los siguientes.

- Seca- Vibrado enérgico.
- Plástica- Vibrado normal.
- Blanda- Apisonado.
- Fluida- Barra.

En la Tabla 1 se presentan los valores de asentamiento recomendados para concretos de diferentes grados de manejabilidad, según el tipo de obra y condición de colocación.

**Tabla 1.** Valores de asentamiento recomendados para diversos tipos de construcción, sistemas de colocación y compactación.

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO (mm)	TIPO DE CONSTRUCCION	SISTEMA DE COLOCACION	SISTEMA DE COMPACTACION
<b>Muy seca</b>	0-20	Pefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentacion	Con vibradores de formaleta, concretos de proyeccion neumatica(lanzados)	Secciones sujeas a vibraciones esterna, puede requerirse presion
<b>Seca</b>	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibracion intensa
<b>Semi-seca</b>	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple. Losas poco reforzadas	Colocacion con maquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas con vibracion
<b>Media(plastica)</b>	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones	Colocacion manual	Secciones simplemente reforzadas con vibracion
<b>Humeda</b>	100-150	Elementos esructurales esbeltos o muy reforzados	Bombeo	Secciones bastante reforzadas con vibracion
<b>Muy humeda</b>	150-200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos in situ	Tubo embudo tremie	Secciones altamente reforzadas sin vibracion
<b>Super fluida</b>	Mas de 200	Elementos muy esbeltos	Autonivelante, autocompactante	Secciones altamente reforzadas sin vibracion y normalmente no adecuados para vibrarse

Fuente: Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá 1994. Capítulo 15, concretos por especialidad- nuevas tecnologías. Pág. 321

### 2.6.3 Durabilidad

Esta propiedad se define como: “la habilidad del concreto en resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería”. Cada tipo de cemento va a generar un concreto con durabilidad diferente que va a depender de la exposición al ambiente a que esté sometido y de cuáles son las propiedades que quieren en ese concreto. Asimismo, la proporción de los componentes del concreto y de las prácticas realizadas en la mezcla cuando esté fresca y endurecida van a influir en la durabilidad del concreto y en su vida útil.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> PEÑAFIEL CARRILLO, Daniela Alejandra. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN AL EMPLEAR VIDRIO RECICLADO MOLIDO EN REEMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO. Universidad Técnica de Ambato Ecuador 2016



#### **2.6.4 Impermeabilidad del concreto**

La impermeabilidad del concreto es la capacidad que posee un material para resistir el paso de los fluidos; en sí, es la capacidad de prevenir el paso del agua dentro de la estructura de concreto. La realización de las estructuras hecho a prueba de agua no sólo es importante para preservar los edificios de la entrada de agua, sino también y sobre todo para reducir la entrada de agentes que degradan el concreto y así prolongar la vida útil de la estructura.<sup>23</sup>

#### **2.6.5 Densidad**

El concreto convencional, normalmente usado en pavimentos, edificios y otras estructuras, tiene un peso específico (densidad, peso volumétrico, masa unitaria) que varía de 2200 hasta 2400 kg/m<sup>3</sup>. La densidad del concreto varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado o incluido y las cantidades de agua y cemento<sup>24</sup>.

#### **2.6.6 Segregación**

Se define como la separación de los agregados que constituyen la mezcla heterogénea del concreto, de manera que su distribución deje de ser uniforme por falta de cohesión. Entre las causas que pueden originar la segregación se encuentran la diferencia de tamaño de las partículas y su distribución granulométrica, así como la densidad de los agregados y su proporción dentro de la mezcla.

De forma general la segregación puede presentarse de dos maneras: La primera en la cual las partículas gruesas tienden a separarse por desplazamiento de la mezcla en conjunto o porque se asientan más que las partículas finas por acción de la gravedad; normalmente esto se presenta en mezclas secas y poco cohesivas, la segunda forma de segregación tiene que ver con la separación de la mezcla (agua y cemento). lo cual ocurre en mezclas húmedas y con pasta muy diluida<sup>25</sup>.

#### **2.6.7 Exudación**

La exudación del concreto se refiere a que parte del agua de la mezcla tiende a elevarse a la superficie del concreto recién colocado durante el proceso de fraguado. Por tal razón se entiende como una forma especial de segregación o de sedimentación de las partículas, las cuales no pueden retener toda el agua cuando se asientan.

---

<sup>23</sup> Revista Sika. Impermeabilidad del concreto. Bogotá. 2014. Pag. 24

<sup>24</sup> Portland Cement Association. Diseño y control de mezclas de concreto. Primera edición. 2004.

<sup>25</sup> Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 1994. Capítulo 5, concreto fresco. Pág. 123

Tanto la cantidad de agua de exudación como la velocidad a la cual esta llega a la superficie del concreto tiene mucho que ver con la evaporación, debido a que, si la velocidad de evaporación es menor que la velocidad de exudación, se forma una película de agua que aumenta la relación agua-cemento en la superficie, que posteriormente queda porosa y con baja resistencia al desgaste. Por otra parte si la velocidad de evaporación es mayor que la velocidad de exudación se pueden producir grietas de contracción plástica<sup>26</sup>.

### **2.6.8 Resistencia al fuego**

El concreto es incombustible, por lo que su naturaleza aislante y protectora contra el fuego se utiliza para preservar el refuerzo de acero. Sin embargo, cuando se expone durante periodos largos al fuego, el material se deforma y se agrieta, lo cual produce el colapso estructural a una capacidad reducida que requeriría el remplazo o reparación después del fuego. El diseño para la resistencia al fuego requiere de las siguientes consideraciones básicas:

1. **Espesor de las partes:** Las losas o muros delgados se agrietarán con rapidez, lo que permite la penetración del fuego.
2. **Recubrimiento del refuerzo:** se requiere que sea más grueso para que genere una resistencia mayor al fuego.
3. **Naturaleza de los agregados:** Algunos más vulnerables que otros a la acción del fuego. Las especificaciones de diseño y los reglamentos de construcción se ocupan de estos temas.

## **2.7 CARACTERÍSTICAS ESFUERZO DEFORMACIÓN DEL CONCRETO**

El esfuerzo es comúnmente una medida de la acción ejercida en el espécimen, y la deformación, una medida de la respuesta. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, en algunos casos, como por ejemplo en asentamientos y contracciones, esta relación se invierte; es decir, las solicitaciones quedan medidas por la deformación y la respuesta está representada por los esfuerzos respectivos. En cilindros con relación de lado a diámetro igual a dos, la falla suele presentarse a través de planos inclinados con respecto a la dirección de la carga. Si se engrasan los extremos del cilindro para reducir las fricciones, o si el espécimen es más esbelto, las grietas que se producen son aproximadamente paralelas a la dirección de aplicación de la carga<sup>27</sup>.

---

<sup>26</sup> Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 1994. Capítulo 5, concreto fresco. Pág. 124

<sup>27</sup> GONZÁLEZ CUEVAS, Óscar. Aspectos fundamentales del concreto reforzado. Cuarta edición. México: Editorial Limusa, 2005. P. 33-34 M

### 2.7.1 Resistencia a la compresión $f'_c$

Se definen a la resistencia a la compresión ( $f'_c$ ) como “la medida máxima de resistencia a carga axial de especímenes de concreto”, es decir es la propiedad del concreto de resistir cargas aplicadas. Esta medida se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg/cm}^2$ ), en megapascuales (MPa) y también en p.s.i. ( $\text{lb/in}^2$ ).

La resistencia a la compresión crece continuamente con el tiempo, sin embargo los reglamentos establecen que debe darse su valor a una edad de 28 días (Araya, 2012). El aumento paulatino de la resistencia con el tiempo suele darse siguiendo un patrón de relaciones, las cuales en los últimos años han cambiado debido a la incorporación de algunos aditivos y puzolanas en la fabricación del cemento. Esta nueva composición del cemento genera un desarrollo más lento de la resistencia del concreto, principalmente en las 3 primeras semanas, pero al mismo tiempo este factor ayuda a obtener concretos más resistentes, densos y durables a mediano y largo plazo (Araya, 2013).

La resistencia a la compresión depende de la relación agua/cemento (A/C), de cuanto ha progresado la hidratación, del curado, de las condiciones ambientales y de la edad del concreto (Williams, 2010). No obstante, de esos factores el que más influye es la relación A/C ya que cuanto más agua se le agrega a la mezcla menor va a ser la resistencia obtenida, esta correlación se debe a que cuando la pasta se endurece quedan poros llenos de agua y de aire que no presentan resistencia, por lo que si hay gran cantidad de poros implicaría la existencia de muchos de estos puntos disminuyendo el valor de resistencia a la compresión, mientras que si hay pocos poros la resistencia tendería a aumentar. Asimismo las proporciones de los componentes con que se realicen las mezclas son importantes, y dependiendo del diseño de cada mezcla y por ende de la cantidad de agregados que se añadan se pueden esperar distintas resistencias a la compresión a la edad de 28 días<sup>28</sup>.

### 2.7.2 Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad  $E_c$ , se define como el cambio de esfuerzo con respecto a la deformación unitaria elástica; en la norma NSR10 en el título C (Concreto Estructura) numeral C.8.5 y C.8.5.1; se define como relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente, para esfuerzos de tracción o compresión menores que el límite de proporcionalidad del material, además establece que el módulo de elasticidad es una medida que depende de la densidad del concreto y se puede calcular para valores de  $E_c$  comprendidos entre 1440 y

---

<sup>28</sup> PEÑAFIEL CARRILLO, Daniela Alejandra. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN AL EMPLEAR VIDRIO RECICLADO MOLIDO EN REEMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO. Universidad Técnica de Ambato Ecuador 2016

2560 Kg/m<sup>3</sup> para un concreto con densidad normal,  $E_c$  puede tomarse como se presenta en la ecuación 1<sup>29</sup>.

**Ecuación 1**

$$E_c = w^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \text{ en MPa}$$

Para concretos de peso normal (2323 kg/m<sup>3</sup>),  $E_c$  puede considerarse como igual a. Para concreto de densidad normal,  $E_c$  puede considerarse como.

El módulo de elasticidad del concreto puede variar en función de diversos factores tales como el estado de humedad y de compactación del concreto, la relación agua/cemento y edad de la pasta y las características de los agregados, principalmente. En relación con la humedad del concreto, se dice que en estado saturado exhibe un módulo de elasticidad más alto que en estado seco (contrariamente a lo que ocurre con la resistencia a compresión) y que este incremento en el módulo puede ser del orden de 3 por ciento.<sup>30</sup>

Según la norma NSR 10, el módulo de elasticidad corresponde a la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria que se produce a partir de la pendiente de la secante trazada desde un esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión de  $0.45f'_c$  en compresión de acuerdo con la norma NTC4025.

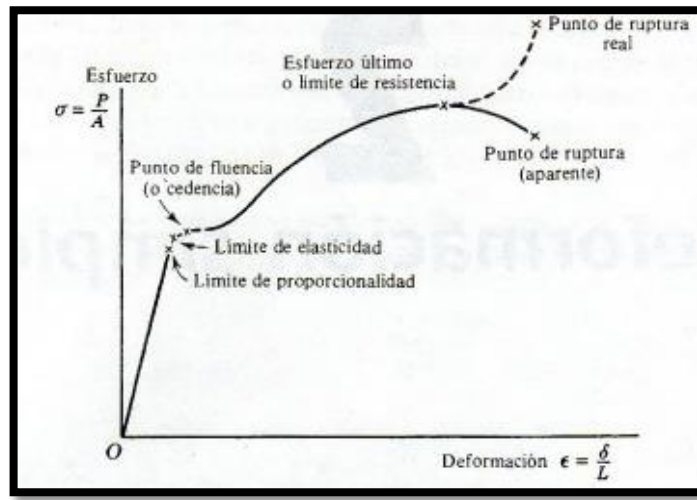
El concreto no es un material eminentemente elástico, esto se puede observar fácilmente si se somete a un espécimen a esfuerzos de compresión crecientes hasta llevarlo a la falla; si para cada nivel de esfuerzo se registra la deformación unitaria del material, se podría dibujar la curva que relaciona estos parámetros, en la Figura 4 muestra la curva esfuerzo-deformación.

---

<sup>29</sup> Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Título C.8.5

<sup>30</sup> Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Título C.8.5.4

**Figura 4.**Curva esfuerzo Deformación



Fuente: SINGER. Resistencia de materiales. Concreto

## 2.8 ESCORIA DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO EAFS

La escoria oxidante del horno de arco eléctrico (EAFS) es un subproducto de la industria siderúrgica, generada después de la fusión y el refinado ácido preliminar del acero líquido. Según estudios realizados, la escoria de horno de arco eléctrico EAFS es un material que puede ser utilizado como agregado en mezclas de hormigón (Arribas, Santamaría, Ruiz, Ortega-López, & Manso, 2015). Las escorias han sido usadas como adición o en combinación proporcional con cemento portland para la fabricación de concretos o morteros. Recientemente el uso de las escorias en la construcción ha aumentado. (Aprianti, 2016). En Estados Unidos y en Europa las escorias han demostrado un buen desempeño en el tiempo, indicando que pueden ser efectivas para reducir el tamaño de poro considerando con ello menor impermeabilidad y mayor durabilidad de las mezclas de concreto. Los concretos combinados con escoria presentan muchas ventajas: mayor durabilidad, calor moderado de hidratación, mayor resistencia a la compresión, menor permeabilidad, resistencia superior a la reacción de sílice alcalina debido a la penetración de iones cloruro y iones sulfato, trabajabilidad, amigables con el medioambiente y reducción en el costo (Muhmood, 2009).<sup>31</sup>

La escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS) es un subproducto resultante de la industria siderúrgica, se produce después de la fusión del acero líquido, el cual posee dos etapas de la ganga ácida "arcillosa" del material de hierro y de las cenizas

<sup>31</sup> Pérez Rojas, Yazmin Andrea. DESEMPEÑO DE ADICIONES EN CONCRETOS CON EAFS Y PROTECCIÓN DEL ACERO DE REFUERZO. Tesis Doctoral .Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia. Tunja 2017

de azufre del coque (igualmente de carácter ácido), con la cal y la magnesia (ambos compuestos básicos) de las calizas más o menos dolomíticas utilizadas como fundentes de la ganga ácida "arcillosa" del material de hierro y de las cenizas de azufre del coque (igualmente de carácter ácido). En estudios realizados en Europa, Estados Unidos y Ecuador las escorian han demostrado un excelente desempeño en el tiempo, indicando que pueden ser empleadas en mezclas de concreto debido a su baja absorción entendiéndose con ello una mayor durabilidad. No obstante, adicionalmente a esto se han evaluado las propiedades mecánicas de las EAFS, logrando resultados satisfactorios en cuanto a la resistencia a la compresión, módulos de elasticidad y valores de expansión, lo que permite verificar y confirmar su alto desempeño. Se concluye entonces que las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los materiales no convencionales tienen una potencial aplicación en la construcción de obras en ingeniería.

## **2.9 VIDRIO Y POLVO DE VIDRIO**

El vidrio es un material artificial o incluso natural que se obtiene por enfriamiento a una velocidad determinada de una mezcla de componentes de tipo inorgánico fundida o bien en el enfriamiento de ciertas rocas fundidas. Desde el punto de vista industrial se logra por este procedimiento, así como por diversos métodos de moldeado, una amplia variedad de materiales con múltiples usos ya sea a nivel de la construcción, industria, tecnología, investigación, etc. En el caso de "vidrios naturales" no sólo han tenido diversas aplicaciones prácticas como utensilios en diversos pueblos antiguos como es el caso de las obsidianas, sino que además tienen un gran interés su estudio en el campo de la Geoquímica.<sup>32</sup>

Aunque desde hace siglos la Naturaleza proporciona los componentes esenciales para la fabricación de vidrios con componentes abundantes y de fácil extracción, hoy en día se utilizan además productos químicos sintéticos y una amplia gama de residuos.

El polvo de vidrio se obtiene de envases reciclados los cuales han sido preparados (lavados y desinfectados) para ser triturados por método manual y mecánico, en el primero se tienen en cuenta todas las indicaciones de seguridad (guantes de carnaza, tapabocas, calzado cerrado, gafas, bata) para reducir los envases a fracciones más pequeñas con ayuda de herramienta de golpe directo. Después de obtener los envases de vidrio en fracciones más pequeñas se procede a utilizar la máquina de los Ángeles para reducir aún más el material. Todo el proceso anteriormente mencionado se realiza con el fin de obtener un material para adicionar un porcentaje en la mezcla de concreto hidráulico con el propósito de observar las

---

<sup>32</sup> BACHILLER: TEJADA ROMERO, GUILLERMO. EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AL REEMPLAZAR PORCENTUALMENTE CEMENTO POR VIDRIO MOLIDO LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN. Perú 2014

ventajas y características físicas y químicas que el polvo de vidrio le puede aportar al diseño de la mezcla<sup>33</sup>.

Según investigaciones realizadas en distintos países, el uso del vidrio reciclado como agregado produce expansión en la mezcla de concreto debido a la reacción álcali-sílice, la que puede ser controlada con la adición de metacaolín (Durán & Sánchez, 2013). El uso de otros materiales cementantes y aditivos reducen el contenido de álcali mitigando el efecto expansivo, entre ellos se encuentran las cenizas volantes, escorias granuladas de alto horno, carbonato de litio ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) y humo de sílice (Pérez Vellez et al., 2016). Se reemplazó el cemento por humo de sílice en proporción del 10% para contrarrestar el efecto expansivo, obteniéndose adicionalmente aumento en la resistencia a la flexión y a la compresión de la mezcla de concreto, reduciendo la relación álcali – sílice, logrando condiciones deseables para remplazos de hasta el 25% por vidrio reciclado. (Parghi & Shahria, 2016).

Las reacciones expansivas en el hormigón se producen por interacción entre compuestos alcalinos del cemento y componentes reactivos de los agregados. De principal importancia se estudia la reacción álcali-sílice por el gran sílice amorfa que presenta el vidrio (Catalan, 2013)<sup>34</sup>.

### **2.9.1 Composición química del vidrio**

El vidrio está constituido primordialmente por sílice derivado de arena, cuarzo o pedernal, constituye alrededor de las  $\frac{3}{4}$  partes. Otros componentes son el óxido de sodio como fundente, óxido de calcio como estabilizante químico – mecánico, óxido de aluminio que mejora la resistencia mecánica al choque térmico, eleva la refractariedad y disminuye la dilatación térmica. Además, se usa materiales como descolorantes, colorantes, fluidificantes, opacificantes, etc.

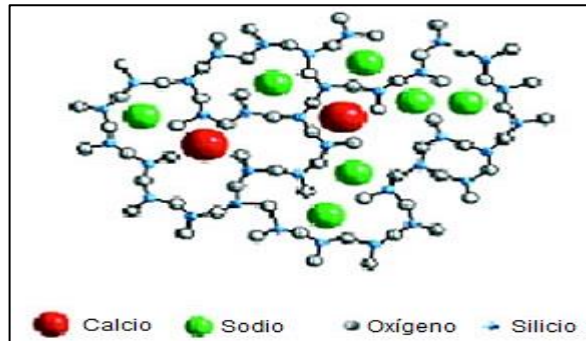
El vidrio forma una red aleatoria en la que cada átomo de silicio se une a 4 átomos de oxígeno y estos a su vez a otros átomos de silicio. El grupo individual presenta una ordenación tetraédrica, aunque la agrupación global de estos grupos se hace de manera desordenada, tal como se observa en la figura 5.

---

<sup>33</sup> CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA. Tipos de concreto con vidrio molido, [en línea]. Michigan, EEUU. Diciembre 2012

<sup>34</sup> Pérez Rojas, Yazmín Andrea. DESEMPEÑO DE ADICIONES EN CONCRETOS CON EAFS Y PROTECCIÓN DEL ACERO DE REFUERZO. Tesis Doctoral .Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia. Tunja 2017

**Figura 5.** Composición química del vidrio



Fuente: Tomado de triplenlace. Disponible en <https://triplenlace.com/2013/02/04/quimica-del-vidrio/>, citado el 2 de febrero de 2018

Las propiedades del vidrio común, son una función tanto de la naturaleza como de las materias primas como de la composición química del producto obtenido. Esta composición química se suele representar en forma de porcentajes en peso de los óxidos más estables a temperatura ambiente de cada uno de los elementos químicos que lo forman.

Así, desde el punto de vista estructural el vidrio está constituido por:

- a) Óxidos formadores de la red vítrea, vitrificantes, tales como el óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y el óxido de difosforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), para los tipos de productos vítreos más generales o tradicionales.
- b) Óxidos modificadores de la red vítrea, fundentes, que aportan enlaces por los denominados "oxígenos no-puente", en los que se caracterizan óxidos alcalinos como lo son: Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) u óxidos alcalinotérreos como el caso del óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y el óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ).
- e) Óxidos "estabilizantes" que tienen un carácter intermedio o anfótero, aportando los denominados "oxígenos puente", tales como el óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Además de su composición, el vidrio presenta una serie de características que lo hacen ser un material alternativo en la producción de concreto mucho más interesante, de esta manera entre las características más relevantes se mencionan las siguientes:

- Muestra un patrón de interacción de Rayos X difuso.
- No tiene punto de fusión definido.
- No rompe en direcciones preferenciales.
- Es isotrópico.



**Tabla 2.**Composición química del vidrio.

NOMENCLATURA QUÍMICA	NOMBRE DEL COMPUESTO	% PRESENTE EN EL VIDRIO
SiO	Óxido de silicio	72.5
AlO <sub>3</sub>	Trióxido de aluminio	0.4
CaO	Óxido de calcio	9.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trióxido de dihierro	0.2
MgO	Óxido de magnesio	3.3
Na <sub>2</sub> O	Óxido de sodio	13.7
K <sub>2</sub> O	Óxido de potasio	0.1

Fuente: Efecto en la resistencia a la compresión al reemplazar porcentualmente cemento por vidrio molido las mezclas de hormigón. Perú 2014

## 2.10 MÉTODO A.C.I 211

Hoy en día existen diversos métodos de diseño disponibles y ellos dan aproximadamente las mismas proporciones relativas de materiales, probablemente el método más común y utilizado en muchos países entre los cuales se incluye Colombia, es la “Practica recomendable para dosificar concreto normal conocido como el método A.C.I.2011.

Tal como lo menciona el documento Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón, “Este método es el resultado de extensas investigaciones, en el campo del hormigón, de varias organizaciones norteamericanas entre ellas la A.C.I. Se fundamenta en los trabajos experimentales de Andrew Duff Abrams, Richart y Talbot, Goldbeck y Gray. Es un método empírico cuyos resultados han sido confirmados por una amplia información experimental. El procedimiento de diseño se puede realizar ya sea mezclando los materiales por volumen absoluto y luego calculando los pesos de cada uno de los componentes, directamente, calculando el peso del hormigón y deduciendo luego el peso de cada uno de los ingredientes, siempre para obtener un metro cubico de hormigón. Ambas formas de cálculo de la mezcla tienen en cuenta todo lo relacionado con la facilidad de colocación, resistencia a la compresión o a la flexión, durabilidad y economía.”<sup>35</sup>

El Comité 211 del A.C.I ha desarrollado un procedimiento de diseño de mezclas bastante simple el cual, basándose en una serie de tablas permite obtener valores de los diferentes materiales que integran la unidad cúbica del concreto. El procedimiento para la selección de las proporciones que se presentan es aplicable

<sup>35</sup> GIRALDO BOLIVAR, Orlando. Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón. Resumen. [En línea]. Medellín. [Citado 2 de Febrero de 2018]. Disponible en internet < <http://www.bdigital.unal.edu.co/40215/1/3352874.19873.pdf>>

a concretos de peso normal y a las condiciones que para cada una de las tablas se indican en ellas. Aunque los mismos datos básicos y procedimientos pueden ser empleados en el diseño de concretos pesados y concretos ciclópeos, al tratar éstos se da la información complementaria.

La información previa de los materiales para realizar el diseño tal como lo estipula el diseño A.C.I 211 es el siguiente.

Datos de los materiales.

- Análisis granulométrico de los agregados.
- Cálculo del módulo de finura de la arena y estimación del tamaño máximo del agregado.
- Pesos específicos aparentes y porcentaje de absorción de los agregados.
- La humedad de los agregados inmediatamente antes de preparar las mezclas.
- Calidad de los agregados, materia orgánica, partículas finas, livianas, débiles.
- Calidad del agua de mezclado.<sup>36</sup>

Otros aspectos importantes son las características de obra que establece limitaciones a quien tiene la responsabilidad de diseñar la mezcla. Entre dichas limitaciones pueden estar:

- Relación agua-cemento máxima.
- Contenido mínimo de cemento.
- Contenido máximo de aire.
- Asentamiento.
- Tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Resistencia en compresión mínima.
- Requisitos especiales relacionados con la resistencia promedio, el empleo de aditivos, o la utilización de tipos especiales de cemento o agregados.

La estimación de las cantidades de materiales requeridas para la preparar la unidad cúbica de concreto implica una secuencia cuyo cumplimiento permite, en función de las características de los materiales, preparar la mezcla adecuada para el trabajo que se va a efectuar.<sup>37</sup>

---

<sup>36</sup> GIRALDO BOLÍVAR, Orlando. Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón. Información previa para el diseño de la mezcla. [En línea]. Medellín. [Citado 2 de Febrero de 2018]. Disponible en internet < <http://www.bdigital.unal.edu.co/40215/1/3352874.19873.pdf> >

<sup>37</sup> TEJADA ROMERO, Guillermo. EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN AL REEMPLAZAR PORCENTUALMENTE CEMENTO POR VIDRIO MOLIDO LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN. Perú 2014

### 3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

En el presente capítulo se exponen los resultados de la caracterización de los materiales empleados para la presente investigación (agregado grueso, fino, cemento, EAFS y polvo de vidrio reciclado PVR), mediante la aplicación de los ensayos de laboratorio especificados en la normativa Colombiana del INVIAS 2013, para un nivel de tránsito 1 (NT1), especificado como “Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es inferior a  $0.5 \times 10^6$  ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño”<sup>38</sup>. Lo anterior con el fin de obtener las propiedades físico-mecánicas de los agregados y realizar una comparación con los valores establecidos por las mismas normas.

#### 3.1 ADQUISICIÓN DE LOS MATERIALES

Para la correcta realización del diseño de concreto hidráulico no convencional se debe contar con materiales que cumplan con las especificaciones generales de construcción de carreteras 2013 del Instituto Nacional de Vías INVIAS, de esta manera se presentan las canteras y sitios de los cuales se obtuvieron los materiales para el desarrollo de la investigación.

##### 3.1.1 Agregado grueso.

La grava empleada para el diseño de la mezcla de concreto, fue suministrada por la cantera de Santa Lucía, ubicada en el Municipio de Cucaita en Boyacá.

**Figura 6.** Agregado grueso grava



Fuente: Registro Fotográfico Propio

---

<sup>38</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. INVIAS. Especificaciones Generales de Construcción de carreteras. Artículo 100. 2013 p 1.

### 3.1.2 Agregado fino

La arena utilizada en la mezcla fue proporcionada por la cantera del Alto del Moral, ubicada en la ciudad de Tunja.

**Figura 7.** Agregado fino arena



Fuente: Registro Fotográfico Propio

### 3.1.3 Escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS).

La escoria usada en el diseño fue traída de la planta de DIACO, ubicada en la vía Tunja-Paipa, dentro de la jurisdicción de los municipios de Tuta y Sotaquirá en el departamento Boyacá.

**Figura 8.** Agregado grueso EAFS



Fuente: Registro Fotográfico Propio

### 3.1.4 Polvo de vidrio.

El polvo de vidrio utilizado se consiguió en presentación de envases de vidrio, encontrados en diferentes puntos de reciclaje ubicados en la ciudad de Tunja. Este fue procesado previo a su utilización mediante procesos como limpieza, desinfección, lavado, secado y triturado.

**Figura 9.** Agregado fino vidrio



Fuente: Registro Fotográfico Propio

### 3.1.3 Cemento

El cemento utilizado para la realización de todo el diseño fue de marca Argos tipo I.

## 3.2 TIPOS DE ENSAYOS Y NORMAS

Para la realización de los ensayos necesarios para la caracterización de los materiales utilizados, se siguieron los procedimientos provistos por las normas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) 2013 referentes a la sección 100 suelos y la sección 200 agregados pétreos. Luego de obtener los resultados se realizó una comparación con las especificaciones INVIAS 2013 del capítulo 5 Pavimentos de concreto, con el fin de saber si el material cumple o no con los requisitos de calidad para la utilización de los mismos en el diseño de un concreto hidráulico.

A continuación, se mencionan los ensayos realizados a los materiales.

### 3.2.1 Propiedades Agregado Grueso (Grava y EAFS).

Se considera la porción del agregado grueso retenida en el tamiz No.4. Este agregado deberá proceder de la trituración de roca o grava o una combinación de ambas, sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de

partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, no deberá contener polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan afectar la calidad de la mezcla<sup>39</sup>.

### 3.2.2 Desgaste en máquina de los Ángeles

El ensayo corresponde a la norma INV- E 218-13. En el cual se obtiene la degradación del material después de pasar por un proceso de desgaste. En la figura 10 se muestra el equipo utilizado en el ensayo.

**Figura 10.**Máquina de los Ángeles



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

En la tabla 3 se presentan los valores obtenidos de desgaste para el agregado grueso grava y EAFS.

**Tabla 3.**Resultados desgaste máquina de los Ángeles agregado grueso.

<b>Desgaste grava</b>		<b>Desgaste EAFS</b>	
P1 (g)	5,000	P1 (g)	5,000
P2 (g)	3,199	P2 (g)	4,019
% Desgaste (i)	36.03%	% Desgaste (i)	19,60%
<b>% DESGASTE</b>	<b>36</b>	<b>% DESGASTE</b>	<b>20</b>

Fuente: Los autores

### 3.2.3 Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval

Este ensayo se realizó con la norma INV- E 238-13. En la figura 11 se muestra el equipo utilizado en el ensayo.

<sup>39</sup>Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.INVIAS 2013.Capitulo 5.Pavimentos de concreto

**Figura 11.** Equipo Micro – Deval



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

En la tabla 4 se presentan los valores obtenidos de desgaste para el agregado grueso grava y EAFS.

**Tabla 4.** Resultados desgaste equipo Micro-deval agregado grueso.

Desgaste grava		Desgaste EAFS	
A(g)	1,500.300	A (g)	1,502.3
B (g)	1,144.6	B (g)	1,398
% Desgaste (i)	23.71%	% Desgaste (i)	6.96%
% DESGASTE	23	% DESGASTE	7

Fuente: Los autores

#### 3.2.4 Resistencia mecánica por el método del 10% de finos

El ensayo corresponde a la norma INV- E 224-13. En la figura 12 se muestra el procedimiento para realizar el ensayo.

**Figura 12.** Resistencia mecánica por el método de 10% de finos.



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de desgaste para el agregado grueso grava y EAFS.

**Tabla 5.** Resultados desgaste por el método 10% de finos agregado grueso.

<b>desgaste grava</b>		<b>Desgaste EAFS</b>	
F1(KN)	97.49	F1(KN)	107.8
F2(KN)	91.10	F2(KN)	104.34
<b>F(prom)KN</b>	<b>95</b>	<b>F(prom)KN</b>	<b>105</b>

**Fuente:** Los autores

### 3.2.5 Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfatos

El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV- E 220-13. En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de solidez para el agregado grueso grava y EAFS.

**Tabla 6.** Resultados ensayo de solidez agregado grueso.

<b>%Pérdida de Solidez Grava</b>	2.46
<b>%Pérdida de Solidez EAFS</b>	1.66

**Fuente:** Los autores

Según la especificación en el capítulo 5, tabla 500-4 (requisito para agregado grueso), el valor máximo de % pérdida en solidez de sulfato de magnesio es de 15%, comparando este valor con el resultado obtenido se puede apreciar que se cumple este requisito ya que el valor obtenido es de 2.46% para la grava y 1.66% para la EAFS.

### 3.2.6 Terrones de arcilla y partículas deleznales

El ensayo corresponde a la norma INV- E 211-13. En la tabla 7 se presenta los resultados obtenidos del ensayo de partículas deleznales del agregado grueso grava y EAFS.

**Tabla 7.** Resultados ensayo Porcentaje de arcilla y partículas deleznales agregado grueso.

<b>Agregado</b>	<b>P</b>
grava	2.8
EAFS	2.7

**Fuente:** Los autores



El requisito según la tabla 500-2 y 500-4, de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, INVIAS 2013, artículo 500, es de 3% de terrones de arcilla y partículas deleznales como valor máximo, comparando este valor con el resultado obtenido se puede apreciar que se cumple este requisito ya que el valor obtenido es de 2.8% para el agregado grueso.

### 3.2.7 Partículas fracturadas mecánicamente (una cara)

El ensayo corresponde a la norma INV- E 227-13. En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de partículas fracturadas del agregado grueso.

**Tabla 8.** Resultados ensayo Porcentaje de arcilla y partículas deleznales agregado grueso.

PARTÍCULAS FRACTURADAS AGREGADO GRUESO	
P	90 %

Fuente: Los autores

El requisito según la tabla 500-4, de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, INVIAS 2013, artículo 500, es de 60 % como valor mínimo, comparando este valor con el resultado obtenido se puede apreciar que se cumple este requisito ya que el valor obtenido es de 90% para el agregado grueso.

### 3.2.8 Partículas planas y alargadas.

El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento de la norma INV- E 240-13. En la figura 13 se observa el equipo utilizado para realización del ensayo.

**Figura 13.** Ensayo Partículas planas y alargadas.



Fuente: Registro Fotográfico Propio

En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de partículas planas y alargadas agregado grueso grava.

**Tabla 9.** Resultados ensayo Partículas largas y aplanadas agregado grueso

<b>PARTÍCULAS LARGAS Y APLANADAS GRAVA</b>	
Relación (5:1)	3.91 %

Fuente: Los Autores

Según la especificación 500, tabla 500- 4, del Instituto Nacional de Vías INVIAS, el porcentaje máximo para el ensayo debe ser del 10% en la relación 5:1.

### 3.2.9 Gravedad específica y absorción

Se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV- E 223-13. En las tablas 10,11 y 12 se presentan los resultados obtenidos de la gravedad específica y absorción de los agregados gruesos grava y EAFS, además se presentan los resultados para la combinación 50% grava-50% EAFS.

**Tabla 10.**Resultados obtenidos gravedad específica y absorción grava.

<b>Resultados agregado grueso-grava</b>	
Peso canastilla en el aire(g)	2971
Peso canastilla en agua(g)	7399
Masa de la muestra seca (g)	2955
Peso canastilla+suelo sumergido (g)	9198
Peso canastilla+suelo SSS, (g)	6061
Masa de muestra SSS, (g)	3090
Masa de la muestra sumergida,(g)	1799
Densidad Nominal (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.56</b>
Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.29</b>
Densidad Bulk SSS (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.39</b>
Absorción %	<b>4.6</b>

Fuente: Los Autores

**Tabla 11.** Resultados obtenidos gravedad específica y absorción EAFS.

<b>Resultados agregado grueso-EAFS</b>	
Peso canastilla en el aire(g)	2971
Peso canastilla en agua(g)	7399
Masa de la muestra seca A (g)	2944
Peso canastilla+suelo sumergido (g)	9502
Peso canastilla+suelo SSS,B (g)	5948
Masa de muestra SSS, (g)	2977
Masa de la muestra sumergida,C(g)	2103
Densidad Nominal (g/cm <sup>3</sup> )	<b>3.50</b>
Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>3.37</b>
Densidad Bulk SSS (g/cm <sup>3</sup> )	<b>3.41</b>
Absorción %	<b>1.1</b>

Fuente: Los Autores

**Tabla 12.** Resultados obtenidos gravedad específica y absorción Combinación 50% grava-50%EAFS.

<b>Resultados combinación 50% grava-50% EAFS</b>	
Peso canastilla en el aire(g)	2971
Peso canastilla en agua(g)	7399
Masa de la muestra seca A (g)	2722
Peso canastilla+suelo sumergido (g)	9211
Peso canastilla+suelo SSS,B (g)	5773
Masa de muestra SSS, (g)	2802
Masa de la muestra sumergida,C(g)	1812
Densidad Nominal (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.99</b>
Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.75</b>
Densidad Bulk SSS (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.83</b>
Absorción %	<b>2.9</b>

Fuente: Los Autores

### 3.2.10 Granulometría

Es la distribución de los tamaños de las partículas que componen los agregados, para determinar la granulometría de los agregados la norma que gobernó este proceso fue la INV-E 213 la cual especifica el método y análisis de tamizado de agregados gruesos y finos. Dentro de los conceptos que se deben manejar y analizar en la realización del análisis granulométrico se tiene: Módulo de finura y Tamaño máximo del agregado grueso.

- **Tamaño Máximo Nominal del Agregado:** El tamaño máximo nominal de un agregado, es el menor tamaño de la malla por el cual debe pasar la mayor parte del agregado, la malla de tamaño máximo nominal puede retener de 5% a 15% del agregado dependiendo del número de tamaño<sup>40</sup>.
- **Tamaño Máximo del Agregado:** Se entiende como la menor abertura del tamiz a través del cual se requiere que pase la totalidad del agregado<sup>41</sup>.

En las tablas 13 y 14 y en las figuras 14 y 15 se muestran los resultados obtenidos de la granulometría de los agregados gruesos empleados en la investigación.

**Tabla 13.** Datos obtenidos para el agregado grueso grava.

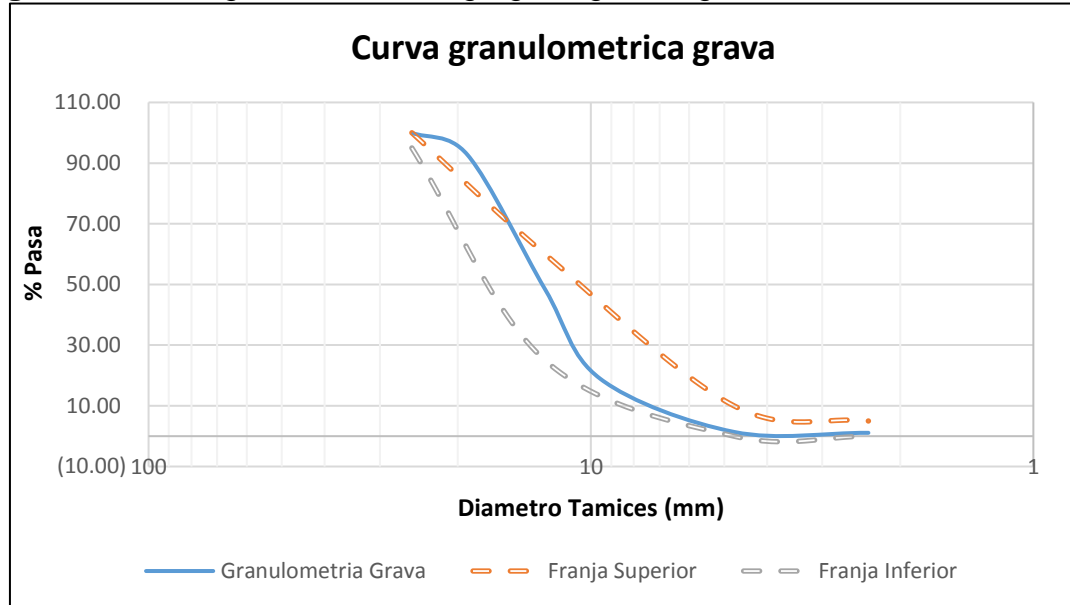
N° TAMIZ	DIÁMETRO(mm)	PESO RETENIDO(g)	%RETENIDO	% PASA
<b>1"</b>	25.4	0	0.00	100.00
<b>3/4"</b>	19.01	365	7.30	92.70
<b>1/2"</b>	12.70	2214	44.28	48.42
<b>3/8"</b>	9.53	1476	29.52	18.90
<b>No.4</b>	4.75	875	17.50	1.40
<b>No. 8</b>	2.36	15	0.30	1.10
<b>Fondo</b>		55	1.10	-

Fuente: Autores

<sup>40</sup> Sánchez de Guzmán, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 1994. Capítulo 5, concreto fresco. Pág. 123

<sup>41</sup> GIRALDO BOLIVAR, Orlando. Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón. Información previa para el diseño de la mezcla. [En línea]. Medellín. [Citado 2 de Febrero de 2018]. Disponible en internet < <http://www.bdigital.unal.edu.co/40215/1/3352874.19873.pdf> >

**Figura 14.**Curva granulométrica agregado grueso-grava.



Fuente: Autores

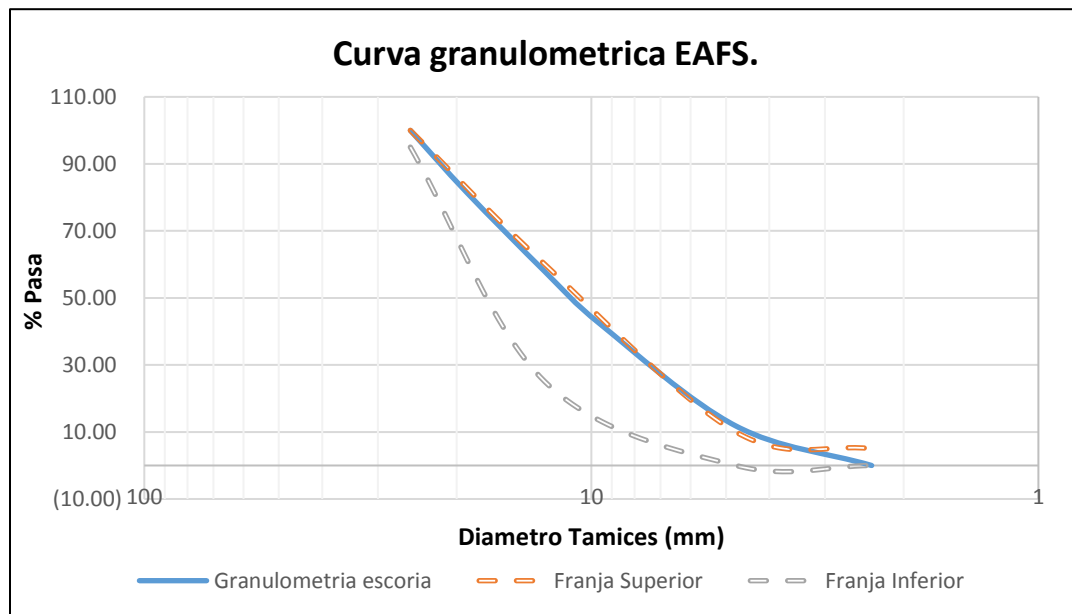
En la tabla 14 y figura 15 se presenta la granulometría original de la EAFS, a la cual posteriormente se le realizó un tratamiento para ajustarla a las bandas granulométricas de la especificación, llevando la granulometría de la EAFS a la gradación de la grava.

**Tabla 14.**Valores obtenidos para agregado grueso EASF.

N° TAMIZ	DIÁMETRO(mm)	PESO RETENIDO(g)	%RETENIDO	% PASA
<b>1"</b>	25.4	0	0.00	100.00
<b>3/4"</b>	19.01	924	18.48	81.52
<b>1/2"</b>	12.70	1184	23.68	57.84
<b>3/8"</b>	9.53	789	15.79	42.05
<b>No.4</b>	4.75	1513	30.25	11.80
<b>No.8</b>	2.36	590	11.80	0.00
<b>Fondo</b>		0	0.00	0.00

Fuente: Autores

**Figura 15.**Curva granulométrica agregado grueso-EAFS.



Fuente: Los Autores

### 3.3 Propiedades agregado fino (arena y polvo de vidrio reciclado PVR)

El agregado fino se considera a la fracción que pasa el Tamiz N°4, este provendrá de arenas naturales o de trituración de rocas, gravas, escorias siderúrgicas u otros productos que resulten adecuados, el módulo de finura del agregado fino se deberá encontrar entre 2.3 y 3, además la gradación del agregado escogido para la mezcla no podrá presentar más de 45% de material retenido entre dos tamices consecutivos<sup>42</sup>.

#### 3.3.1 Pérdida en el ensayo de solidez en sulfatos

El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento de la norma INV- E 220-13. Como resultado del ensayo se obtuvo un valor de 1.74%. Según la especificación, capítulo 5, tablas 500-2 (requisito para agregado fino) el valor máximo de porcentaje de pérdida en solidez de sulfato de magnesio es de 15%, comparando este valor con el resultado obtenido se puede apreciar que se cumple este requisito.

<sup>42</sup> Especificaciones para la construcción de carreteras 2013.INVIAS.Capitulo 5.Pavimento de Concreto. Artículo 500.Pag 4.

### 3.3.2 Índice de plasticidad

El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV- E 125 y 126-13, dando como resultado que tanto la arena como el vidrio no presentaron plasticidad, este resultado es congruente con lo esperado ya que para el polvo de vidrio no presentó contenido alguno de arcilla.

Comparando el resultado obtenido con lo establecido por la especificación para agregado fino, es posible el uso de estos materiales en el concreto al ser estos agregados no plásticos.

### 3.3.3 Equivalente de arena

El ensayo se realizó según el procedimiento descrito en la norma INV- E 133-13. En la figura 16 se presentan los equipos y el montaje de los mismos usados en la elaboración del ensayo.

**Figura 16.** Ensayo equivalente de arena.



Fuente: Registro Fotográfico Propio

En la tabla 15 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 15.** Resultado equivalente de arena.

Muestra	Lectura Arena (pulg)	Lectura Arcilla (pulg)	Equivalente de Arena (%)
No. 1	3.1	4.8	65.0
No. 2	3.0	4.8	63.0
No. 3	3.1	4.9	64.0
No. 4	3.0	4.9	62.0
Promedio			63.5

Fuente: Los autores

Según la especificación 500, tabla 500-2 del Instituto Nacional de Vías INVIAS, el porcentaje mínimo de equivalente de arena debe ser del 60% para ser aceptado, como se observa en la tabla 18 el resultado obtenido es superior al porcentaje mínimo especificado por la norma, por lo tanto, el material está cumpliendo este requisito.

#### **3.3.4 Material que pasa el tamiz N°200**

El ensayo se realizó según el procedimiento descrito en la norma INV- E 214-13. Resultando un valor de 2.8%. Según la especificación 500, tabla 500- 2, del Instituto Nacional de Vías INVIAS, el porcentaje máximo para el ensayo debe ser del 3% de material que pasa el tamiz No. 200; como se observa, el resultado obtenido cumple con este requisito.

#### **3.3.5 Absorción de agregado fino**

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV-E 222-13, se determina la densidad del agregado fino y su absorción. En la figura 17 se presentan los equipos utilizados para la realización del ensayo.

**Figura 17.**Ensayo densidad y absorción de agregado fino.



Fuente: Registro Fotográfico Propio

En las tablas 16 a 20 se presentan los resultados obtenidos de la determinación de la gravedad específica y absorción del agregado fino (arena y polvo de vidrio reciclado PVR), además para cada una de las combinaciones.



**Tabla 16.**Resultados gravedad específica y absorción arena.

<b>Resultados agregado fino-arena</b>	
Peso matraz vacío (g)	176.3
Volumen del matraz(cm <sup>3</sup> )	500
Masa de la muestra seca (g)	492.7
Peso del matraz agua B (g).	480.8
Masa o volumen de agua añadida	304.5
Peso de la muestra saturada superficialmente seca (g)	500
Peso del matraz +agua+muestra	980.8
Densidad nominal (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.62</b>
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.52</b>
Densidad bulk SSS (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.56</b>
Absorción %	<b>1.5</b>

Fuente: Los autores

**Tabla 17.** Resultados gravedad específica y absorción polvo de vidrio reciclado.

<b>Resultados agregado fino-polvo de vidrio reciclado</b>	
Peso matraz vacío (g)	176.6
Volumen del matraz(cm <sup>3</sup> )	500
Masa de la muestra seca A(g)	492.7
Masa o volumen de agua añadida	297.2
Peso del matraz+agua B(g)	473.8
Peso de la muestra saturada superficialmente seca S(g)	500
Peso del matraz +agua+muestra C (g)	973.8
Densidad nominal (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.46</b>
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.47</b>
Densidad bulk SSS (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.47</b>
Absorción %	<b>0</b>

Fuente: Los autores

**Tabla 18.** Resultados gravedad específica y absorción 80% arena-20% vidrio.

<b>Resultados agregado fino combinación 80%arena-20%vidrio</b>	
Peso matraz vacío (g)	176.6
Volumen del matraz(cm <sup>3</sup> )	500
Masa de la muestra seca (g)	492.7
Peso del matraz agua B (g).	480.8
Masa o volumen de agua añadida	301.7
Peso de la muestra saturada superficialmente seca (g)	500
Peso del matraz +agua+muestra	978.3
Densidad nominal (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.58</b>

**Tabla 18.** Continuación

<b>Resultados agregado fino combinación 80%arena-20%vidrio</b>	
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.49</b>
Densidad bulk SSS (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.52</b>
Absorción %	<b>1.4</b>

Fuente: Los autores

**Tabla 19.** Resultados gravedad específica y absorción 70% arena-30%vidrio.

<b>Resultados agregado fino combinación 70% arena-30% vidrio</b>	
Peso matraz vacío (g)	176.6
Volumen del matraz(cm <sup>3</sup> )	500
Masa de la muestra seca (g)	492.7
Peso del matraz agua B (g).	480.8
Masa o volumen de agua añadida	302.4
Peso de la muestra saturada superficialmente seca (g)	500
Peso del matraz +agua+muestra	979
Densidad nominal (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.57</b>
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.5</b>
Densidad bulk SSS (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.53</b>
Absorción %	<b>1.1</b>

Fuente: Los autores

**Tabla 20.** Resultados gravedad específica y absorción 60% arena-40%vidrio.

<b>Resultados agregado fino combinación 60% arena-40% vidrio</b>	
Peso matraz vacío (g)	176.3
Volumen del matraz(cm <sup>3</sup> )	500
Masa de la muestra seca (g)	492.7
Peso del matraz agua B (g).	480.8
Masa o volumen de agua añadida	301.6
Peso de la muestra saturada superficialmente seca (g)	500
Peso del matraz +agua+muestra	977.9
Densidad nominal (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.56</b>
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.5</b>
Densidad bulk SSS (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.52</b>
Absorción %	<b>1.0</b>

Fuente: Los autores

### 3.3.6 Granulometría.

Este ensayo se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la INV-E 213, el cual especifica el método y análisis de tamizado de agregados gruesos y finos. Haciendo

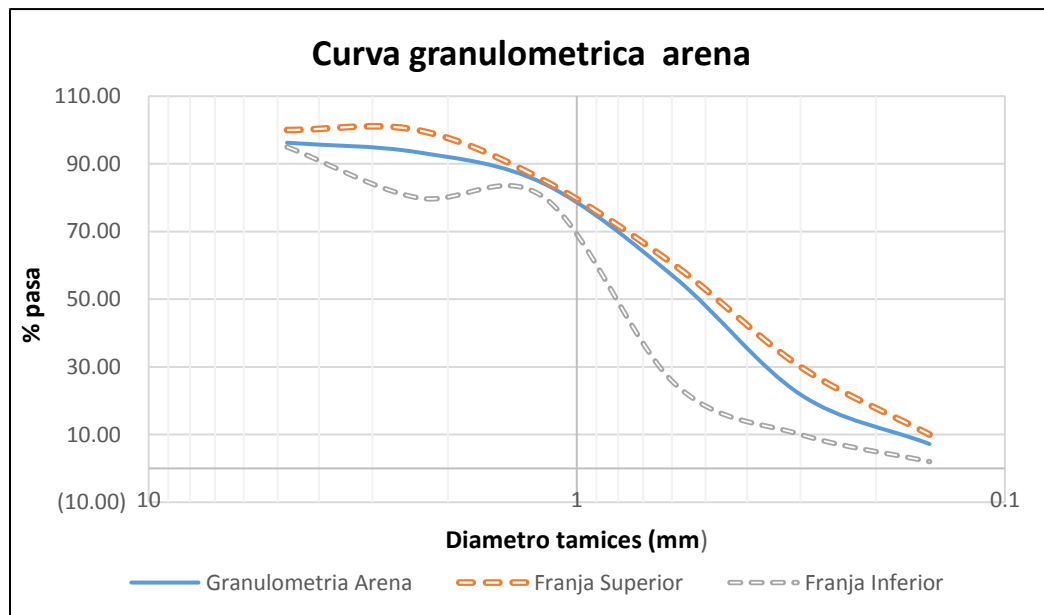
uso de las especificaciones de construcción de carreteras del INVIAS 2013, capítulo 5 Pavimentos de Concreto y las norma INVE-213-13, en las tablas 21 y 22 y las figuras 18 y 19, se presentan los resultados del análisis granulométrico obtenido para el agregado fino arena y polvo de vidrio reciclado.

**Tabla 21.**Valores obtenidos para agregado fino arena.

N° TAMIZ	DIÁMETRO(mm)	PESO RETENIDO(g)	%RETENIDO	% PASA	%RETENIDO ACUMULADO
<b>No.4</b>	4.75	188	3.76	96.24	3.76
<b>No.8</b>	2.36	140	2.80	93.44	6.56
<b>No. 16</b>	1.19	468	9.36	84.08	15.92
<b>No. 30</b>	0.59	1384	27.68	56.40	43.60
<b>No. 50</b>	0.30	1730	34.60	21.80	78.20
<b>No. 100</b>	0.15	730	14.60	7.20	92.80
<b>Fondo</b>		360	7.20	-	100.00

**Fuente:** Los autores

**Figura 18.**Curva granulométrica agregado fino arena.



**Fuente:** Los autores

Se puede observar que la granulometría de la arena se encuentra dentro de las franjas definidas por la especificación, siendo posible la utilización de este agregado como material dentro de la elaboración de un pavimento rígido. En el caso del vidrio como anteriormente se mencionó, este se obtuvo de envases los cuales luego de un proceso de limpieza fueron triturados primero por método manual y finalmente

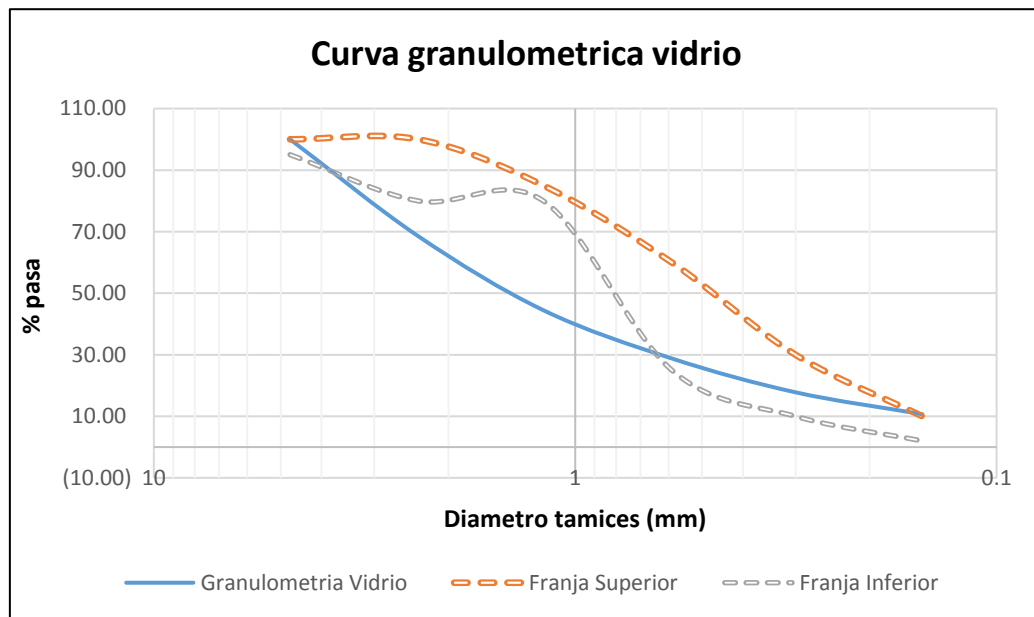
se llevaron a la máquina de los Ángeles para un triturado final. Dando como resultado la siguiente gradación.

**Tabla 22.** Valores obtenidos para agregado fino polvo de vidrio reciclado al salir de la máquina de los Ángeles.

N° TAMIZ	DIÁMETRO(mm)	PESO RETENIDO(g)	%RETENIDO	% PASA	%RETENIDO ACUMULADO
<b>No.4</b>	4.75	0	0.00	100.00	-
<b>No.8</b>	2.36	1572	31.43	68.57	31.43
<b>No. 16</b>	1.19	1205	24.10	44.47	55.53
<b>No. 30</b>	0.59	783	15.67	28.80	71.20
<b>No. 50</b>	0.30	550	11.00	17.80	82.20
<b>No. 100</b>	0.15	357	7.13	10.67	89.33
<b>fondo</b>		533	10.67	-	100.00

Fuente: Los autores

**Figura 19.** Curva granulométrica agregado fino polvo de vidrio reciclado al salir de la máquina de los Ángeles.



Fuente: Los autores

Analizando la gráfica 19 se puede observar que la granulometría del vidrio obtenida al salir de la máquina de los Ángeles y luego de realizar el proceso de tamizado manual, la gradación resultante no se encontró dentro de las franjas granulométricas definidas por la especificación, razón por la cual fue necesario realizar un tratamiento a la gradación para ajustarla a las franjas granulométricas definidas por la especificación INVIAS 2013.

El tratamiento que se le dio al vidrio puntualmente fue llevarlo a la granulometría presentada en la arena, es decir luego de un proceso de triturado mediante el uso de la máquina de los Ángeles se procedió a realizar un trabajo de tamizado manual de las partículas resultantes haciendo uso de la franja de tamices (No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.100 y el fondo) utilizadas para la gradación de agregado fino; realizado lo anterior se procedió a tomar los pesos retenidos en cada tamiz y verificar que estos se encontrarán dentro de los definidos en las especificación del INVIAS para agregado fino.

### 3.3.7 Módulo de Finura.

Este ensayo se basa en los datos obtenidos en el análisis granulométrico, consiste en sumar los porcentajes de material retenido acumulado hasta el tamiz No 100, y se divide entre 100<sup>43</sup>. El resultado de módulo de finura obtenido para el agregado fino fue de 2.41.

Analizando el resultado obtenido de módulo de finura del agregado fino y teniendo presente que dentro de la Especificación del INVIAS se recomienda que los módulos de finura del agregado se encuentren entre un intervalo de 2.3 a 3.1, se concluye que se está cumpliendo este requisito.

## 2.4 RESUMEN DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS Y CUMPLIMIENTO SEGÚN ESPECIFICACIONES INVIAS 2013

En el siguiente apartado se muestran los datos obtenidos de la caracterización realizada a los materiales que se utilizaron en el desarrollo de la investigación según las Especificaciones de Construcción de Carreteras del INVIAS 2013. En las tablas 23 a 26 se presenta una comparación de los valores obtenidos producto de la caracterización de los agregados con los valores establecidos según las especificaciones INVIAS 2013.

**Tabla 23.** Caracterización agregado grueso grava.

NORMA INVIAS	ENSAYO	RESULTADO	VALOR ESPECIFICACIÓN INVIAS	OBSERVACIÓN
INV-E-218-13	Desgaste en la máquina de Los Ángeles (%)	36%	Máximo 40%	CUMPLE

<sup>43</sup> RAMÍREZ, Oscar. Geotecnia básica: Apuntes de clase. Segunda edición Tunja, grupo de imprenta y publicaciones UPTC, ISBN: 660-062-9.

**Tabla 23.** Continuación

<b>NORMA INVIAS</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>VALOR ESPECIFICACIÓN INVIAS</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
INV-E-238-13	Degradación por abrasión Micro- Deval	24%	Máximo 30%	CUMPLE
INV-E-224-13	Resistencia Mecánica por el método 10% de Finos. Valor seco	95	Mínimo 90%	CUMPLE
INV-E-220-13	Perdida en el ensayo de solidez por medio de sulfato de sodio	2.46%	Máximo 10 %	CUMPLE
INV-E-211-13	Terrones de arcilla y partículas Deleznables	2.8%	Máximo 3%	CUMPLE
INV-E-227-13	Partículas Fracturadas mecánicamente una cara	90%	Mínimo 60%	CUMPLE
INV-E-240-13	Partículas Planas y alargadas	3.91%	Máximo 10%	CUMPLE

Fuente: Los autores

**Tabla 24.** Caracterización agregado grueso-EAFS.

<b>NORMA INVIAS</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>VALOR ESPECIFICACIÓN INVIAS</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
INV-E-218-13	Desgaste en la máquina de Los Ángeles (%)	20%	Máximo 40%	CUMPLE

**Tabla 24.** Continuación

<b>NORMA INVIAS</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>VALOR ESPECIFICACIÓN INVIAS</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
INV-E-238-13	Degradación por abrasión Micro- Deval	2%	Máximo 30%	CUMPLE
INV-E-224-13	Resistencia Mecánica por el método 10% de Finos. Valor seco	100%	Mínimo 90%	CUMPLE
INV-E-220-13	Perdida en el ensayo de solidez por medio del sulfato de sodio	1.66	Máximo 10 %	CUMPLE
INV-E-211-13	Terrones de arcilla y partículas Deleznables	2.8%	Máximo 3%	CUMPLE
INV-E-227-13	Partículas Fracturadas mecánicamente una cara	90	Mínimo 60%	CUMPLE
INV-E-240-13	Partículas Planas y alargadas(Relación 5:1)	3.91%	Máximo 10%	CUMPLE

Fuente: Los autores

**Tabla 25.** Caracterización agregado fino arena

<b>NORMA INVIAS</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>VALOR ESPECIFICACIÓN INVIAS</b>	<b>OBSERVACIÓN</b>
INV-E-220-13	Perdida en el ensayo de solidez por medio del ensayo de sulfato de sodio	1.74	Máximo 10 %	CUMPLE

**Tabla 25.** Continuación

NORMA INVIAS	ENSAYO	RESULTADO	VALOR ESPECIFICACIÓN INVIAS	OBSERVACIÓN
INV-E-133-13	Equivalente de Arena	0.6	Mínimo 60%	CUMPLE
INV-E-211-13	Terrones de arcilla y partículas deleznales	0.80	Máximo 3 %	CUMPLE
INV-E-114-13	Material que pasa por el tamiz N°200	2.8%	Máximo 3%	CUMPLE
INV-E-222-14	Absorción	1.5	Máximo 4%	CUMPLE

Fuente: Los autores

**Tabla 26.** Caracterización agregado fino vidrio

NORMA INVIAS	ENSAYO	RESULTADO	VALOR ESPECIFICACIÓN INVIAS	OBSERVACIÓN
INV-E-220-13	Perdida en el ensayo de solidez por medio del sulfato de sodio	1.74%	10%	CUMPLE
INV-E-125 y 126-13	Índice de Plasticidad	NP	NP	CUMPLE
INV-E-211-13	Terrones de arcilla y partículas desneables	0.80%	Máximo 3 %	CUMPLE
INV-E-114-13	Material que pasa por el tamiz N°200	2.80%	Máximo 3%	CUMPLE
INV-E-222-14	Absorción de agua	0%	Máximo 4%	CUMPLE

Fuente: Los autores



#### **4. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Para el diseño de la mezcla se empleó el método A.C.I.211 debido a que este es el método más común y utilizado en muchos países entre los cuales se incluye Colombia.

Se realizaron cuatros tipos de mezclas:

- Mezcla 1: comprendida por agregados convencionales grueso, fino, cemento y agua.
- Mezcla 2, con un 50% de grava, 50% de escoria EAFS, 20% de polvo de vidrio reciclado, 80% de arena, cementó y agua.
- Mezcla 3, con un 50% de grava, 50% de escoria EAFS, 30% de polvo de vidrio reciclado, 70% de arena, cementó y agua.
- Mezcla 4, con un 50% de grava, 50% de escoria EAFS, 40% de polvo de vidrio reciclado, 60% de arena, cementó y agua.

#### **DISEÑO DE LA MEZCLA**

Como se mencionó anteriormente el diseño de mezcla para pavimento rígido se realizó por el método A.C.I.211, una resistencia requerida de 28 MPa con un nivel de tránsito NT1, que cumpla con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS 2013.

A continuación, se presenta el procedimiento de diseño utilizado paso a paso.

1. Selección de asentamiento.
2. Selección del tamaño máximo del agregado.
3. Estimación del contenido de aire.
4. Estimación del contenido de agua de mezclado.
5. Determinación de la resistencia de diseño.
6. Selección de la relación agua-cemento.
7. Cálculo del contenido de cemento.
8. Estimación de las proporciones de agregados.
9. Ajuste por humedad de los agregados y ajuste de las mezclas de prueba.

Serán necesarios los siguientes datos para realizar el proceso de diseño de la mezcla:

- **Agregado grueso:**

- Peso unitario compactado: 1311 kg/m<sup>3</sup>.
- Densidad aparente seca: 2.29 g/cm<sup>3</sup>.
- Absorción: 4.6 %.
- Humedad Natural: 1.01%.

- **Agregado fino:**

- Densidad aparente: 2.52 g/cm<sup>3</sup>.
- Absorción: 1.5%.
- Humedad Natural: 3.95%.

- **Cemento:**

- Tipo de cemento: Cemento Argos UG.
- Peso específico del cemento: 3.15 g/cm<sup>3</sup>.

Una vez definidos los pasos y datos necesarios para la elaboración de un diseño de mezcla por el método A.C.I 211, se presenta el diseño realizado para la investigación.

**1. Determinación del Asentamiento:** Según la norma de ensayo INV-E 404 y la especificación del capítulo 5 Pavimentos de concretos, el asentamiento para una estructura de losa de concreto rígido debe estar entre 25-50 mm.

**Figura 20** .Valores de asentamiento para un pavimento de concreto.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Asentamiento ( mm):		
- Formaleta fija	E-404	25 a 50
- Formaleta deslizante		13 a 38

Fuente: Especificaciones para Construcción de Carreteras 2013.Capitulo 5 Pavimentos en concreto.

**2. Selección del Tamaño Máximo del Agregado (TM):** Hay varios parámetros que condicionan la elección del tamaño máximo del agregado, lo cual permite hacer una elección del material según el uso para el que sea destinado dicho agregado.

Para el diseño se tiene un tamaño máximo del agregado correspondiente a (3/4") o 19,05 mm.

### 3. El contenido de aire

Según la tabla 27 el contenido de aire es 2%.

**Tabla 27.** Cantidad aproximada de aire en concreto con aire incluido para diferentes tamaños máximos de agregado.

Tamaño máximo nominal del agregado		Contenido de aire en porcentaje por volumen			
		Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición ligera
mm	Pulg				
9.51	3/8	3	4.5	6.0	7.5
12.7	1/2	2.5	4.0	5.5	7.0
19	3/4	2.0	3.5	5.0	6.5
25.4	1	1.5	3.0	4.5	6.0
38.1	1 1/2	1.0	2.5	4.5	5.5
50.8	2	0.5	2.0	4.0	5.0
76.1	3	0.3	1.5	3.5	4.5
152	6	0.2	1.0	3.0	4.0

Fuente: SÁNCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. P.232

**4. Estimación del contenido de agua de mezclado:** El agua necesaria para el mezclado del concreto tiene gran importancia debido a que cumple dos funciones primordiales en la conformación del mismo, la primera de ellas es hidratar el concreto, aspecto necesario para que la mezcla obtenga la resistencia necesaria, la segunda, es dar a la mezcla una consistencia manejable la cual permitirá hacer una colocación adecuada del material, sin embargo es necesario tener dicho aspecto con un control adecuado, ya que el exceso de agua, provoca en la mezcla una cantidad de vacíos indeseables luego de su evaporación, efecto que generará una disminución en la resistencia del concreto.

Para un asentamiento de 50 mm, un TM = 3/4" o 19,05 mm y con un contenido de aire del 2% del volumen total, el contenido de agua es de 185 Kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 28.** Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, en concreto sin aire incluido.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado en pulgadas						
		1/2	3/4	1	1' 1/2	2'	2' 1/2	3
mm	Pulg	Agua de mezclado en Kg/m <sup>3</sup> de concreto						
0	0	201	178	171	158	147	141	132
25	1	208	181	175	164	154	147	138
50	2	214	185	183	170	159	151	144
75	3	218	203	188	175	164	156	148
100	4	221	207	192	179	168	159	151
125	5	225	210	196	183	172	162	153
150	6	230	214	200	187	176	165	157
175	7	235	218	205	192	181	170	163
200	8	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. P.234

## 5. Determinación de la resistencia de diseño

En la tabla 29 se presentan los valores de la resistencia de diseño  $f'_c$  utilizada.

**Tabla 29.** Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar.

Resistencia especificada $f'_c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia de diseño de la mezcla (Kg/cm <sup>2</sup> )
Menos de 210 Kg/cm <sup>2</sup>	$f'_c + 70$ Kg/cm <sup>2</sup>
De 210 Kg/cm <sup>2</sup> a 350 Kg/cm <sup>2</sup>	$f'_c + 85$ Kg/cm <sup>2</sup>
Más de 350 Kg/cm <sup>2</sup>	$f'_c + 100$ Kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. P.237

Como el valor de resistencia de diseño corresponde a 28 MPa o 280 Kg/cm<sup>2</sup>, el valor de  $f'_c$  correspondería a:

$$f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2 + 85 \text{ kg/cm}^2 = 365 \text{ kg/cm}^2$$

**6. Selección de la relación agua-cemento:** La relación agua-cemento determina la proporción en peso de la cantidad de material cementante con relación al agua adicionada a la mezcla.

Para la determinación de la relación agua-cemento se tuvo presente la correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días y la relación agua-cemento para los cementos colombianos Portland tipo I, en concretos sin aire incluido. En la tabla 30 se presenta el resultado de la relación agua-cemento.

**Tabla 30.** Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, Portland tipo I, en concretos sin aire incluido.

Relación Agua/Cemento por peso	
Resistencia de compresión a 28 días, kg/cm <sup>2</sup> (f'cr)	concreto sin inclusión de aire
420	0.41
350	0.48
280	0.57
210	0.68
140	0.82

Fuente: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, COMMITTEE 211. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete.

Como el valor obtenido de la resistencia de f'cr fue de 365 kg/cm<sup>2</sup>, se interpolaron los valores resaltados en el cuadro de color rojo de la figura 30 con relaciones A/C entre 0.41 y 0.48 obteniendo como resultado una relación de A/C de 0.47 para el valor de f'cr

**7. Cálculo del contenido de cemento:** Para la determinación del contenido de cemento se parte de los datos antes definidos como lo son el contenido de agua por metro cúbico y la relación A/C, por medio del uso de la ecuación 2 se presenta el cálculo correspondiente así:

$$C = \frac{A}{\frac{A}{C}}$$

$$C = \frac{185 \text{ Kg}}{0.47}$$

$$C = 393.6 \text{ Kg}$$

De donde:

C=Cemento

A=Agua

R A/C =Relación agua-cemento

**8. Estimación de las proporciones de agregados:** En primer lugar, es necesario estipular el volumen del agregado grueso en estado seco y compactado por volumen unitario de concreto, para esto es indispensable conocer el módulo de finura (MF) del agregado fino.

De la tabla 13, para módulo de finura del agregado fino = 2.41 (de ensayo), con los valores presentados en la tabla 31 interpolando se tiene un volumen de agregado grueso de  $0.659 \text{ m}^3_{\text{agregado}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$ .

De acuerdo con los ensayos realizados al agregado que se empleará, se tiene que:  
Masa unitaria apisonada =  $1311 \text{ Kg}/\text{m}^3$

Entonces:

$$\text{Peso seco agregado grueso en la mezcla} = 0.659 * 1311 = 863.949 \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$\text{Volumen absoluto agregado grueso} = \frac{863.949}{2290} = 0.377 \text{ m}^3 \text{ agregado gr}/\text{m}^3 \text{ concreto}$$

**Tabla 31.** Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Tamaño máximo nominal del agregado		Módulo de finura de la arena			
mm	Pulg	2.40	2.60	2.80	3.0
9.51	3/8	0.5	0.48	0.46	0.44
12.7	1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
19	3/4	0.66	0.64	0.62	0.6
25.4	1	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1 1/2	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	2	0.78	0.76	0.74	0.72
76.1	3	0.82	0.80	0.78	0.76
152	6	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. P.241

**CUANTÍAS DE LA MEZCLA EN VOLUMEN:**

$$\text{Vol de cemento} = \frac{393.6 \text{ Kg}/\text{m}^3}{3100 \text{ Kg}/\text{m}^3} = 0.127 \text{ m}^3_{\text{cemento}}/\text{m}^3_{\text{concreto}}$$

$$Vol\ de\ agua = \frac{185\ Kg/m^3}{1000\ Kg/m^3} = 0.185\ m^3\ agua/m^3\ concreto$$

$$Vol\ de\ aire = 0.02\ m^3\ aire/m^3\ concreto$$

$$Vol\ de\ agregado = 1m^3 - (0.127 + 0.185 + 0.02) = 0.668\ m^3\ gr/m^3\ concreto$$

$$Vol\ agregado\ fino = 0.668\ m^3\ gr/m^3\ concreto - 0.377 = 0.291\ m^3\ gr/m^3\ concreto$$

En la tabla 32 se presentan los valores de las cantidades obtenidas por metro cubico m<sup>3</sup> de hormigón.

**Tabla 32.** Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón.

Material	Volumen absoluto m <sup>3</sup> material/m <sup>3</sup> concreto
Cemento	0.127
Agua	0.185
Contenido de aire	0.02
Agregado grueso	0.377
Agregado fino	0.291
<b>TOTAL</b>	<b>1.000</b>

Fuente: los autores

En la tabla 33 se presentan las cantidades por peso de los agregados por metro cúbico de concreto.

**Tabla 33.** Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón

Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón agregados secos		
Material	Peso(kg)	Proporción
Cemento	393.6	1
Agua	185	0.47
Agregado grueso	865.92	2.20
Agregado fino	732.096	1.86

Fuente: Los autores

**9. Ajuste por humedad:** Los agregados tanto gruesos como finos conservan en su matriz interna humedad, por lo cual se debe calcular el valor del peso húmedo de dichos agregados, para esto se suma el valor de la humedad natural al peso seco y así determinar el peso húmedo de los agregados, por esta razón fue necesario la realización de una corrección por humedad.

- **Peso húmedo del agregado grueso**

Peso húmedo del agregado grueso =  $865.92 \text{ Kg/m}^3 \cdot (1 + \text{humedad natural})$

Peso húmedo del agregado grueso =  $865.92 \text{ Kg/m}^3 \cdot (1 + 0.0101) = 874.66 \text{ Kg/m}^3$

- **Peso húmedo del agregado fino**

Peso húmedo del agregado fino =  $732.096 \text{ Kg/m}^3 \cdot (1 + \text{humedad natural})$

Peso húmedo del agregado fino =  $732.096 \text{ Kg/m}^3 \cdot (1 + 0.0395) = 761.013 \text{ Kg/m}^3$

Adicionalmente es necesario tener en cuenta la absorción que presenten los agregados ya que esta no hace parte del agua de mezclado y deberá excluirse para realizar el ajuste, además, será necesario tener en la humedad en los agregados para finalizar el ajuste por humedad. Para este proceso se utilizará la expresión 11.25 tomada del libro 'Tecnología del concreto y del mortero' de Diego Sánchez de Guzmán.

- **Absorción de los agregados**

$$A_a = (+)(-)P_s * \frac{(H - CA)}{100}$$

En donde:

Aa: Agua en exceso o defecto respecto de la condición SSS.

Ps: Peso seco del agregado.

H: Humedad del agregado.

CA: Capacidad de absorción del agregado.

El signo positivo o negativo en el inicio de la expresión se selecciona apoyado en las propiedades de humedad y absorción de cada uno de los agregados:

- Si la absorción < humedad natural, la expresión empezará con '-'.  
- Si la absorción > humedad natural, la expresión empezará con '+'.  
- Si la absorción = humedad natural, la expresión empezará con '0'.



- Si la absorción > humedad natural, la expresión empezará con '+’.

Entonces se tiene que:

$$A_a = 865.92 * \frac{(1.01\% - 4.6)}{100} - 728 * \frac{(3.95\% - 1.5\%)}{100} = -48.92 \text{ Kg/m}^3$$

Se determina que la mezcla tiene agua en exceso por lo cual el ajuste de cantidad de agua debe quedar, así:

$$\text{Peso húmedo agua} = 185 - 48.92 = 136.08 \text{ Kg/m}^3$$

En la tabla 34 se presentan el resumen de los valores húmedos por metro cúbico de hormigón luego del ajuste por humedad para el diseño de la mezcla patrón.

**Tabla 34.**Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón corrección por humedad.

<b>Resumen peso seco y peso húmedo de agregado por metro cubico de concreto.</b>		
<b>Material</b>	<b>Peso Seco(kg/m³)</b>	<b>Peso Húmedo(Kg/m³)</b>
Cemento	393.6	393.6
Agua	185	136.08
Agregado grueso	865.92	874.66
Agregado fino	732.09	761.01
Total	2176.61	2165.35

Fuente: Los autores

**10. Ajuste por resistencia:** Luego de la verificación y ajuste de la cantidad de agua adicional y definidas las cantidades por metro cúbico de concreto se realizaron las mezclas de prueba usando las proporciones presentadas en la tabla 34, para la revisión de la resistencia se realizaron inicialmente cilindros de prueba siguiendo el procedimiento descrito en la norma INV-E-402-13, los cuales se fallaron a una edad de 7 y 28 días. Con esta verificación se tendría una idea general del comportamiento de la mezcla en cuanto a resistencia proyectada, para entender si era necesario hacer ajustes al diseño. En total se fundieron 6 cilindros de las mezclas no convencionales y 2 de la mezcla patrón.

Se calculó la resistencia esperada a los 28 días arrojando como resultado el no cumplimiento de la resistencia requerida en el alcance de trabajo de investigación, por lo tanto fue necesario realizar los ajustes correspondientes al diseño por resistencia.

Como resultado del ajuste de resistencia en la tabla 35 se presentan el resumen de las cantidades y proporciones con las cuales se realizó el diseño.

**Tabla 35.** Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón corrección por resistencia.

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón, diseño patrón</b>		
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>	<b>Proporción</b>
Cemento	608.1	1
Agua	273.645	0.45
Agregado grueso	863.502	1.42
Agregado fino	510.804	0.84

Fuente: Los autores

Por ende, se obtuvo que para el cumplimiento de la resistencia requerida fue necesario un concreto con relación arena/cemento 1:0.84, grava/cemento 1:1.42 y relación agua/cemento 1:0.45.

Definido el diseño con las cantidades y proporciones para el diseño patrón luego de realizar los respectivos ajustes presentados en la tabla 35, se procedió a realizar la sustitución de los agregados finos y gruesos con adiciones de (EAFS) y polvo de vidrio reciclado (PVR) en las combinaciones que se exponen en la tabla 36.

**Tabla 36.** Porcentaje de sustitución de agregados pétreos por agregados artificiales.

<b>Numero de mezcla</b>	<b>% Sustitución agregado grueso</b>		<b>%Sustitución agregado fino</b>	
	<b>grava</b>	<b>EAFS</b>	<b>arena</b>	<b>vidrio</b>
<b>Mezcla 1</b>	50%	50%	80%	20%
<b>Mezcla 2</b>	50%	50%	70%	30%
<b>Mezcla 3</b>	50%	50%	60%	40%

Fuente: Los autores

Se realizaron tres mezclas con la respectiva sustitución en peso de grava y arena por EAFS y vidrio en los porcentajes mencionados en la tabla 36, razón por la cual se presentan en las tablas 37 a 39 las cantidades para cada una de las mezclas.

**Tabla 37.**Resumen cantidades mezcla 1 (20% vidrio, 80% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón mezcla 1</b>		
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>	<b>Proporción</b>
Cemento	595.5	1
Agua	267.97	0.45
Agregado grueso	845.61	1.42
Agregado fino	500.22	0.84

Fuente: Los autores

**Tabla 38.** Resumen cantidades mezcla 2 (30% vidrio, 70% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón mezcla 2</b>		
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>	<b>Proporción</b>
Cemento	637.39	1
Agua	286.825	0.45
Agregado grueso	905.09	1.42
Agregado fino	535.407	0.84

Fuente: Los autores

**Tabla 39.** Resumen cantidades mezcla 3 (40% vidrio, 60% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cúbico de hormigón mezcla 3</b>		
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>	<b>Proporción</b>
Cemento	662.40	1
Agua	298.08	0.45
Agregado grueso	940.608	1.42
Agregado fino	556.416	0.84

Fuente: Los autores

## **4.2. ELABORACIÓN DE CILINDROS Y VIGAS DE CONCRETO**

La elaboración de las probetas se realizó en el laboratorio de pavimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y en el laboratorio de Hermanos López ubicado en la ciudad de Tunja. Para la realización de los cilindros

y las vigas fue necesario la utilización de equipos e instrumentos como mezcladora, formaleas metálicas, camisas entre otros tal como se observa en la siguiente figura.

**Figura 21.** Equipos y moldes.



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

Con la dosificación de los materiales convencionales y no convencionales, se mezcla el material para fundir los respectivos cilindros y vigas. El material se preparó incluyendo: lavado de la grava, tamizado de cemento, cernido de la arena, lavado, trituration y tamizado del vidrio como se muestra en la figura 22.

**Figura 22.** Lavado, trituration y tamizado del vidrio



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

Se realiza el ensayo de asentamiento como se observa en la figura 23.

**Figura 23.** Ensayo de asentamiento (Slump)



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

Luego se coloca el concreto ya mezclado en los moldes o formaletas los cuales se deben aceitar con una brocha para facilitar la extracción del espécimen, tal como se observa en la figura 24, se debe tener mucho cuidado al extraer la viga o cilindro del molde para que este no sufra de pérdida ya sea de las puntas o bordes.

**Figura 24.** Moldes aceitados



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

Paso seguido se llenaron los moldes y formaletas con la mezcla y entres capas las cuales fueron apisonadas a  $1/3$  de la altura del cilindro con una varilla, para la colocación de la mezcla en las formaletas para fundir las vigas se procedió de igual manera, pero aplicando 56 golpes en cada capa, después se enraza para obtener una superficie fina como se observa en la figura 25.

**Figura 25.** Viga lista para ser enrazada



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

Por último, para mantener un contenido de humedad óptimo para obtener los resultados de resistencia deseados es necesario realizarle el respectivo curado a las vigas y cilindros en este caso se procede a la inmersión total en agua del espécimen para tal fin como se muestra en la figura 26.

**Figura 26.** Inmersión de los Especímenes en agua



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

Se elaboraron tres cilindros para fallar a 7 días y tres para fallar a 28 días, dos vigas para fallar a 7 días y dos para 28 días para cada una de las mezclas estipuladas y teniendo como guía las especificaciones del manual de INVIAS 2013 se fundieron

los elementos, los cuales tuvieron tiempos diferentes de falla para arrojar los respectivos resultados, las vigas y cilindros se muestran en la figura 27.

**Figura 27.** Vigas y cilindros elaborados



Fuente: Registro Fotográfico Propio.

## 5. RESULTADOS OBTENIDOS

El objetivo principal de esta investigación es analizar el comportamiento de una mezcla de concreto convencional remplazando el agregado grueso por Escoria Negra de Horno de arco eléctrico (EAFS Electric Furnace Slag) y el agregado fino por polvo de vidrio reciclado PVR, mediante la medición de la resistencia a la compresión simple del concreto modificado por medio del ensayo I.N.V.E-410 y la resistencia a la flexotracción en vigas mediante el ensayo I.N.V.E-414.

Se presentan entonces las cantidades necesarias para elaborar un cilindro de 4" de diámetro por 8" de altura con un volumen calculado equivalente a  $0.00165 \text{ m}^3$ , para cada una de las mezclas. En las tablas 40 a 43 se presentan los resultados de los valores obtenidos para la fabricación de un espécimen de ensayo.

**Tabla 40.** Resumen cantidades mezcla patrón.

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón mezcla patrón para un cilindro</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>
Cemento	1.002
Agua	0.451
Agregado grueso (AG)	1.423
Agregado fino (AF)	0.842

Fuente: Los autores

**Tabla 41.** Resumen cantidades mezcla 1 (20% vidrio, 80% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón mezcla 1 para un cilindro</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>
Cemento	0.981
Agua	0.441
Agregado grueso (AG)	1.393
Agregado fino (AF)	0.824

Fuente: Los autores



**Tabla 42.** Resumen cantidades mezcla 2 (30% vidrio, 70% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón mezcla 2 para un cilindro</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>
Cemento	1.050
Agua	0.473
Agregado grueso (AG)	1.491
Agregado fino (AF)	0.882

Fuente: Los autores

**Tabla 43.** Resumen cantidades mezcla 3 (40% vidrio, 60% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón mezcla 2 para un cilindro</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>
Cemento	1.091
Agua	0.491
Agregado grueso (AG)	1.550
Agregado fino (AF)	0.917

Fuente: Los autores

Para el caso de las vigas, sabiendo que estas presentan una sección de 150\*150 mm y un largo de 500 mm su volumen corresponde a 0.01125 m<sup>3</sup>, se presentan en las tablas 44 a 47 las cantidades de material necesarias para la elaboración de una viga para cada una de las mezclas.

**Tabla 44.** Resumen cantidades para la mezcla patrón

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón mezcla patrón para una viga</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>
Cemento	6.841
Agua	3.079
Agregado grueso (AG)	9.714
Agregado fino (AF)	5.747

Fuente: Los autores

**Tabla 45.** Resumen cantidades para la mezcla 1 (20% vidrio, 80% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón mezcla 1 para una viga</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>
Cemento	6.699
Agua	3.015
Agregado grueso (AG)	9.513
Agregado fino (AF)	5.627

Fuente: Los autores

**Tabla 46.** Resumen cantidades para la mezcla 2 (30% vidrio, 70% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón mezcla 2 para una viga</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>
Cemento	7.171
Agua	3.227
Agregado grueso (AG)	10.182
Agregado fino (AF)	6.023

Fuente: Los autores

**Tabla 47.** Resumen cantidades mezcla 3 (40% vidrio, 60% de arena).

<b>Resumen cantidades por metro cubico de hormigón mezcla 3 para una viga</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso(kg)</b>
Cemento	7.452
Agua	3.353
Agregado grueso (AG)	10.582
Agregado fino (AF)	6.260

Fuente: Los autores

## **5.1 RESULTADOS OBTENIDOS**

Para la obtención de los resultados de la investigación, fue necesario elaborar cilindros y vigas de dimensiones conocidas y estipuladas por las especificaciones

IVIAS 2013 y las normas NTC para elaboración de especímenes de concreto, para realizar comparaciones de las mezclas modificadas en base al diseño patrón.

En la tabla 48 se muestran los resultados de flexión para el diseño patrón

**Tabla 48.** Resultados de módulo de rotura para Diseño Patrón

Módulo de rotura del concreto método viga simple para Diseño patrón				
Espécimen	Edad (días)	Carga (Kg)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Promedio módulo de rotura (Kg/cm²)
P1-7	7	2291	30.24	30
P1-7	7	2261	29.75	
P2-28	28	3423	45	42
P2-28	28	3072	39.85	

Fuente: Los autores

En la 49 tabla se muestran los resultados obtenidos al fallar los cilindros a compresión en edades de 7 y 28 días.

**Tabla 49.** Resultados de Compresión para el diseño patrón

<b>Compresión del concreto para Diseño patrón</b>				
<b>Espécimen</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>Carga (Kg)</b>	<b>Esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>P1</b>	7	16213	207	200
<b>P1</b>	7	16213	201	
<b>P1</b>	7	15194	192	
<b>P2</b>	28	26717	322	315
<b>P2</b>	28	23759	291	
<b>P2</b>	28	27226	333	

Fuente: Los autores

#### **5.1.1 Mezcla 50% de escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS) y 20% vidrio**

De igual manera se obtuvieron resultados para la mezcla modificada con el 20 % de vidrio tal como se muestra en la tabla 50.

**Tabla 50.** Resultados de módulo de rotura para la mezcla de 20 % de vidrio molido

Módulo de rotura del concreto método viga simple para mezcla de 50% EAFS y 20% vidrio				
Espécimen	Edad (días)	Carga (Kg)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Promedio módulo de rotura (Kg/cm²)
5020-7	7	2168	27.23	27
5020-7	7	2140	27.02	
5020-28	28	3636	46.59	44
5020-28	28	3132	40.6	

Fuente: Los autores

Se obtuvieron los siguientes resultados para los cilindros fallados a compresión en los cuales se realizaron tres para una edad de 7 y 28 días respectivamente.

**Tabla 51.** Resultados a compresión para la mezcla de 20 % de vidrio molido

<b>Compresión del concreto para mezcla de 50% EAFS y 20% vidrio</b>				
<b>Espécimen</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>Carga (Kg)</b>	<b>Esfuerzo (Kg/cm²)</b>	<b>Promedio esfuerzo (Kg/cm²)</b>
<b>5020-1</b>	7	14888	192	184
<b>5020-1</b>	7	14888	184	
<b>5020-1</b>	7	14480	175	
<b>5020-2</b>	28	29368	356	356
<b>5020-2</b>	28	28144	343	
<b>5020-2</b>	28	30286	369	

Fuente: Los autores

### 5.1.2 Mezcla 50% de escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS) y 30% vidrio

De igual manera se obtuvieron resultados para la mezcla modificada con el 30 % de vidrio tal como se muestra en la tabla 52.

**Tabla 52.** Resultados de módulo de rotura para la mezcla de 30 % de vidrio molido

Módulo de rotura del concreto método viga simple para mezcla de 50% EAFS y 30% vidrio				
Espécimen	Edad (días)	Carga (Kg)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Promedio módulo de rotura (Kg/cm²)
5030-7	7	2311	29.3	28.5
5030-7	7	2194	27.69	
5030-28	28	3531	45.88	44.3
5030-28	28	3307	42.65	

Fuente: Los autores

Se obtuvieron los siguientes resultados para los cilindros fallados a compresión para edades de 7 y 28 días.

**Tabla 53.** Resultados a compresión de la mezcla de 30% de vidrio molido

<b>Compresión del concreto para mezcla de 50% EAFS y 30% vidrio</b>				
<b>Espécimen</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>Carga (Kg)</b>	<b>Esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
5030-1	7	18661	223	217
5030-1	7	18355	220	
5030-1	7	17539	208	
5030-2	28	21720	268	303
5030-2	28	25595	316	
5030-2	28	26411	325	

Fuente: Los autores

### 5.1.3 Mezcla 50% de escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS) y 40% vidrio

De igual manera se obtuvieron resultados para la mezcla modificada con el 40 % de vidrio tal como se muestra en la tabla 54.

**Tabla 54.** Resultados de módulo de rotura para la mezcla de 40 % de vidrio molido

Flexión del concreto método viga simple para mezcla de 50% EAFS y 40% vidrio				
Espécimen	Edad (días)	Carga (Kg)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Promedio módulo de rotura (Kg/cm²)
5040-7	7	26	32.94	33
5040-7	7	26	31.17	
5040-28	28	3194	41.06	42
5040-28	28	3341	42.83	

Fuente: Los autores

Se obtuvieron los siguientes resultados para los cilindros fallados a compresión para edades de 7 y 28 días.

**Tabla 55.** Resultados a compresión de la mezcla de 40% de vidrio molido

<b>Compresión del concreto para mezcla de 50% EAFS y 40% vidrio</b>				
<b>Espécimen</b>	<b>Edad (días)</b>	<b>Carga (Kg)</b>	<b>Esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio esfuerzo (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>5040-1</b>	7	18661	226	234
<b>5040-1</b>	7	19477	238	
<b>5040-1</b>	7	19375	239	
<b>5040-2</b>	28	28960	360	358
<b>5040-2</b>	28	29878	364	
<b>5040-2</b>	28	28960	349	

Fuente: Los autores

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al realizar los respectivos gráficos para explicar el comportamiento de las mezclas de concreto hidráulico no convencional, se realizaron graficas respecto al % de vidrio, teniendo en cuenta que en todas las mezclas el porcentaje de escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS), se mantiene constante con un 50% y un 50% de grava.

### 6.1 INCIDENCIA DE LA EAFS Y PORCENTAJES DE VIDRIO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN A 7 Y 28 DÍAS

En el siguiente apartado se muestra un resumen de los valores obtenidos, al variar el porcentaje de vidrio, teniendo como variable estática el porcentaje de EAFS.

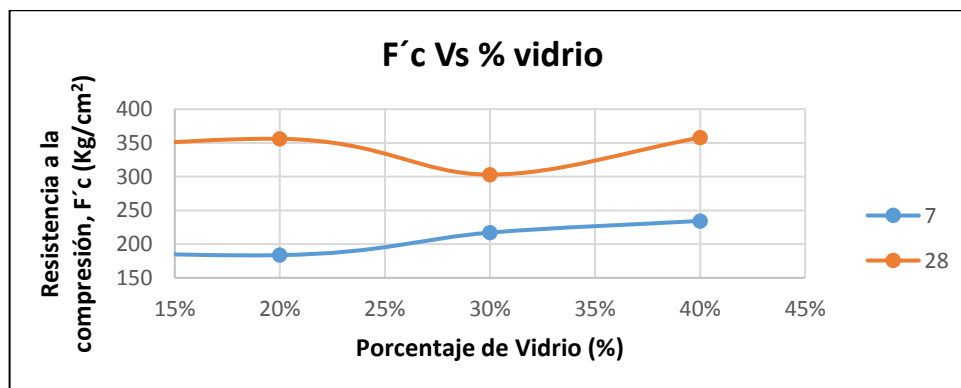
**Tabla 56.** Variación de la resistencia a la compresión,  $f'_c$  con base en el porcentaje de EASF y vidrio molido.

Compresión del concreto (Kg/cm <sup>2</sup> )				
Edad	Porcentaje vidrio			Diseño patrón
	20%	30%	40%	
7	184	217	234	200
28	356	303	358	315

Fuente: Los autores

Para entender de una manera más clara los valores obtenidos en la tabla anterior se realiza la figura 28, en el cual se realizar un análisis estadístico de los datos obtenidos.

**Figura 28.**  $f'_c$  Vs porcentaje de Vidrio

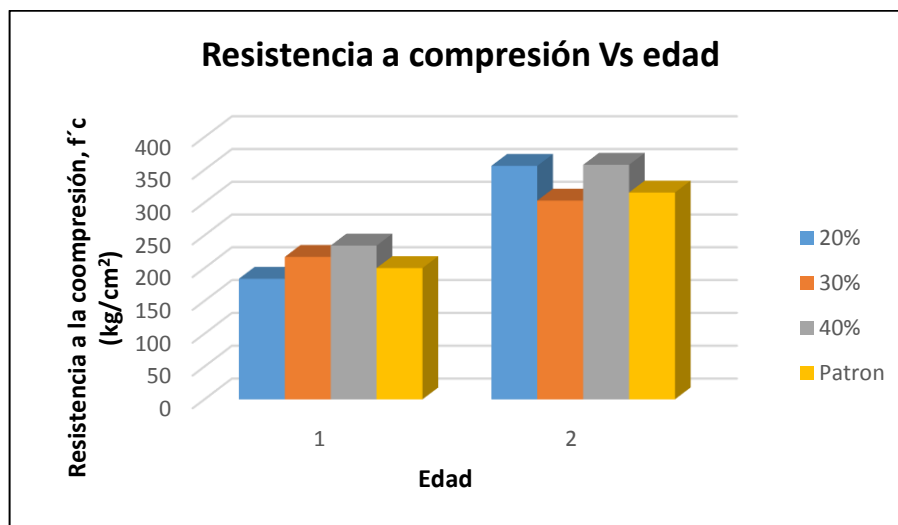


Fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 28, los valores de resistencia varían de los 7 a los 28 días, ya que a los siete días de fallados los cilindros el valor de la resistencia aumenta conforme lo hace el porcentaje de vidrio molido adicionado al concreto, tendencia que no siguen los especímenes a 28 días, porque a medida que aumenta el porcentaje de vidrio el valor de la resistencia tiene un altibajo a la mezcla adicionada con 30% de vidrio, siendo este valor menor a las mezclas con porcentajes de 20%, 40% de vidrio y diseño patrón.

A continuación, se muestra una gráfica que compara los valores obtenidos en los diferentes porcentajes de vidrio respecto con el diseño patrón.

**Figura 29.** Resistencia a compresión Vs edad a 7 y 28 días



Fuente: Los autores

En la figura 29 se observan las mezclas adicionadas con porcentajes de 20%, 30%, 40 % de vidrio y el diseño patrón.

Cabe resaltar que en la figura 29, el número (1) representa la edad a 7 días y el número dos (2) la edad a los 28 días. Según la figura anterior para una edad de siete días los porcentajes de 30 y 40 % de vidrio superan a la resistencia obtenida por el diseño patrón, esta tendencia se mantiene a los 28 días, pero a esta edad los valores mayores al patrón son el 20 y el 40% de vidrio molido adicionado, concluyendo que la mezcla que mantienen la tendencia creciente en cuanto a resistencia a compresión y superando el diseño patrón, es la de 50%EAFS-50%grava con 60% de arena y 40% de vidrio molido.

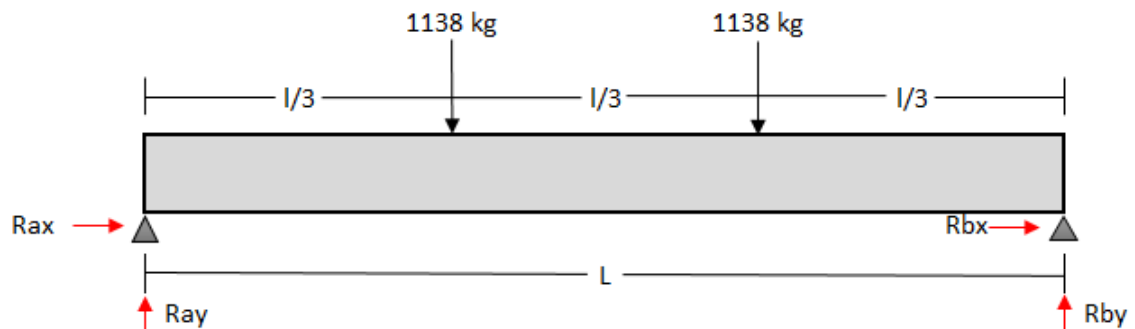


## 6.2 INCIDENCIA DE LA EAFS Y PORCENTAJES DE VIDRIO EN LA RESISTENCIA A FLEXIÓN A 7 Y 28 DÍAS.

En este apartado se realiza el análisis de las vigas falladas a 7 y 28 días, para obtener el valor de flexión del concreto, se tiene en cuenta la deflexión de la viga y teniendo en cuenta la carga aplicada a cada una de las vigas (los valores de carga se encuentran en los anexos, de los ensayos realizados con la norma INV E 414-13) tal como se muestra a continuación

Se colocan dos cargas puntuales en los lugares donde se ubicó los dos aplicadores de carga y soporte, también dos apoyos que tienen estáticamente reacciones en el eje X y Y.

- Diagrama de la viga patrón con una carga aplicada a los 7 días



$$\Sigma f_y = R_{ay} + R_{by} - 1138 \text{ kg} - 1138 \text{ kg}$$

$$\Sigma M_a = -(1138 \text{ kg} * 16.67 \text{ cm}) - (1138 \text{ kg} * 33.34 \text{ cm}) + R_{by} * 50 \text{ cm}$$

$$\Sigma M_a = -(18970.46 \text{ kg/cm}) - (37940.92 \text{ kg/cm}) + R_{by} * 50 \text{ cm}$$

$$\frac{56911.38 \text{ kg/cm}}{50 \text{ cm}} = R_{by}$$

$$1138 \text{ kg} = R_{by}$$

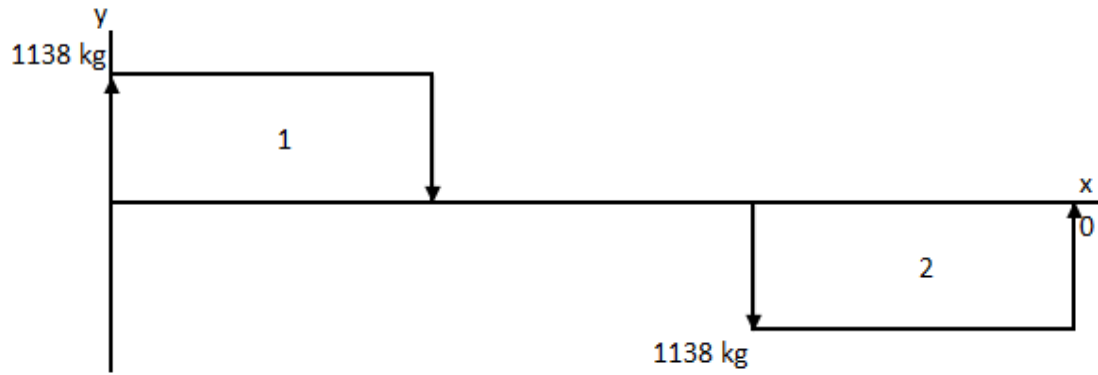
Reemplazando

$$\Sigma f_y = R_{ay} + 1138 \text{ kg} - 1138 \text{ kg} - 1138 \text{ kg}$$

$$-1138 \text{ kg} + 1138 \text{ kg} + 1138 \text{ kg} = R_{ay}$$

$$1138 \text{ kg} = Ray$$

Diagrama de cortante

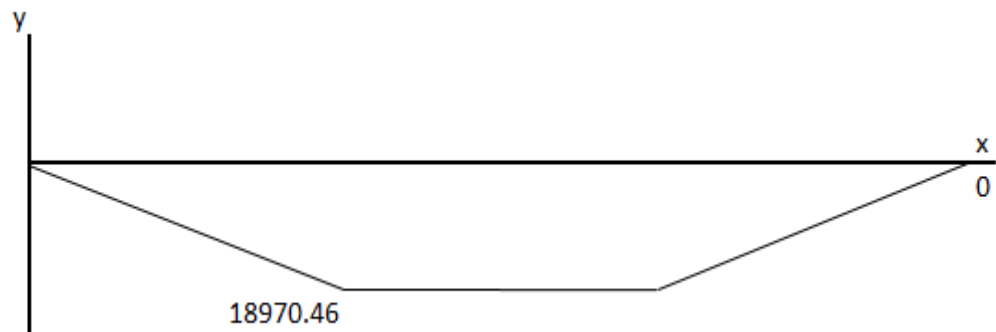


Área

$$1 = 18970.46 \text{ cm}^2$$

$$2 = 18970.46 \text{ cm}^2$$

Diagrama de Momento



Obtenido el valor del momento máximo 18970.46 kg\*cm, se reemplaza en la ecuación para un esfuerzo generado por un momento flexionante tal como se muestra a continuación:

$$\sigma = \frac{Mc}{Ix}$$

De donde:

M = Momento actuante en la viga.

c = distancia desde el eje neutro de la sección transversal de la viga hasta la fibra más alejada, bien sea a compresión o a tracción.

I<sub>x</sub> = inercia alrededor del eje x de la sección transversal de la viga, la cual se calcula con la ecuación:

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{50cm * (15cm)^3}{12} = 14062.5 cm^4$$

Reemplazando los valores en la ecuación se obtiene el siguiente valor:

$$\sigma = \frac{18970.46kg * cm * 7.5 cm}{14062.5 cm^4}$$

$$\sigma = 10.12 kg/cm^2$$

Este mismo procedimiento se realiza para calcular los valores de flexión para el diseño patrón, mezcla con 20% de vidrio, 30 % de vidrio y 40% de vidrio, a 7 y 28 días.

**Tabla 57.** Cálculo del esfuerzo flexionante

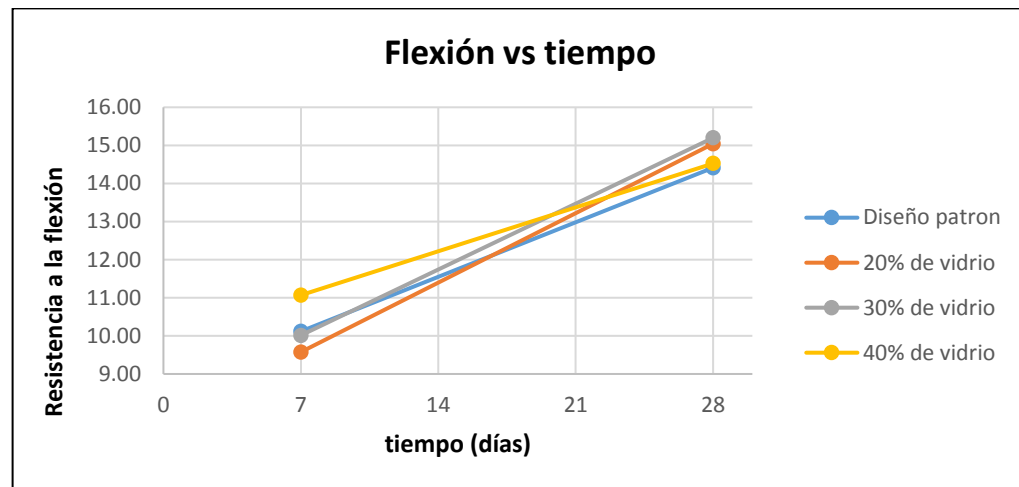
	7 días			28 días		
	M (kg*cm)	I (cm <sup>4</sup> )	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	M (kg*cm)	I (cm <sup>4</sup> )	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )
Diseño patrón	18970.46	14062,5	<b>10.12</b>	27026.2375	14062,5	<b>14.41</b>
20% de vidrio	17953.59		<b>9.58</b>	28205.64		<b>15.04</b>
30% de vidrio	18774.5875		<b>10.01</b>	28497.365		<b>15.20</b>
40% de vidrio	20754.15		<b>11.07</b>	27234.6125		<b>14.53</b>

Fuente: Los autores

En la tabla 57 se muestran los valores de momento (kg\*cm), inercia (cm<sup>4</sup>) y flexión para el diseño patrón, mezclas adicionadas con 20% de vidrio, 30 % de vidrio y 40% de vidrio.

En la figura 30 se muestra el comportamiento de la flexión a los 7 días y 28 días

**Figura 30.** Flexión vs el tiempo en días

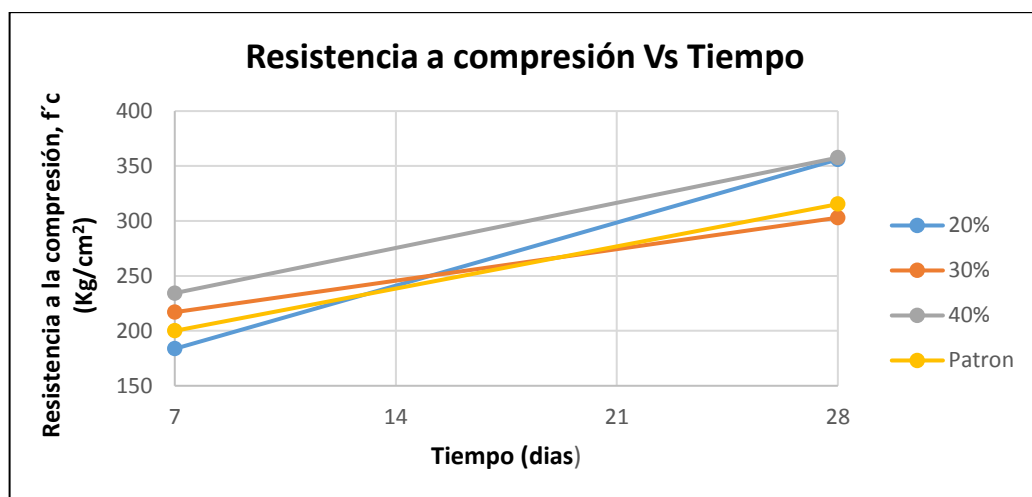


Fuente: Los autores

En la figura 30 se observa que el máximo valor de flexión se da en la mezcla adicionada con 30% de vidrio a los 28 días.

Para observar el comportamiento a 7 y 28 días de las fallas a compresión se muestra la figura 31.

**Figura 31.** Resistencia a compresión Vs tiempo



Fuente: Los autores

Como se puede observar en la figura 31 se obtiene un comportamiento lineal, ya que a medida que aumenta el tiempo aumentan los valores de resistencia a compresión de los diseños analizados.

### 6.3 DENSIDAD EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

A continuación, se presenta un cuadro resumen en el cual se encuentran las densidades del concreto en estado fresco y endurecido.

**Tabla 58.** Cuadro resumen de las densidades del concreto

	Densidad del concreto en estado fresco (gr/cm <sup>3</sup> )	Densidad del concreto en estado endurecido (gr/cm <sup>3</sup> )
Patrón	2.22	2.23
80% agr. Fino-20% vidrio molido	2.42	2.40
70% agr. Fino-30% vidrio molido	2.39	2.38
60% agr. Fino-40% vidrio molido	2.32	2.39

Fuente: Los autores

Como se puede apreciar en la tabla 58, las densidades obtenidas varían entre el rango de 2.22 a 2.4 g/cm<sup>3</sup>. Estos valores según lo especifica INVIAS en el capítulo 500.5.2.8.3 “no se emplearán como criterio para aceptación o rechazo del pavimento construido”, pero se ve que los valores están en el rango de la densidad de un concreto convencional que varía entre 2200 y 2400 Kg/m<sup>3</sup><sup>44</sup>

### 6.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN CON BASE EN EL PORCENTAJE ESTIMADO

Como se puede observar a continuación se muestran los porcentajes promedios a 7 y 28 días de la resistencia a compresión de los cilindros para cada uno de los diseños.

<sup>44</sup> Arquitectura21. Peso unitario, Disponible en. < <http://www.arquitectura21.com/2010/12/cuanto-pesa-el-concreto.html> >. [citado el 5 de Febrero de 2018]

**Tabla 59.** Porcentaje de la resistencia a compresión

	Porcentaje $f'_c$	
	7 días	28 días
% $f'_c$ ESPERADO	<b>65%</b>	<b>99%</b>
Patrón	70%	110%
80% agr. Fino-20% vidrio molido	64%	125%
70% agr. Fino-30% vidrio molido	76%	106%
60% agr. Fino-40% vidrio molido	82%	125%

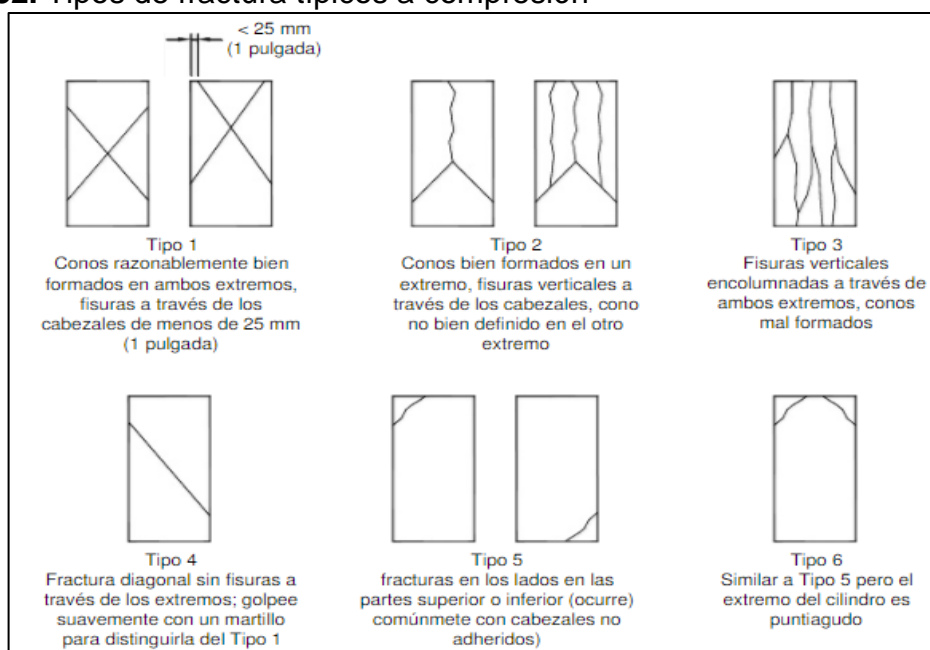
Fuente: Los autores

El porcentaje de resistencia esperado a 7 y 28 debe presentar valores de 65% y 99% respectivamente, como se puede ver en la tabla 57 los valores obtenidos para cada diseño superan los porcentajes estimados para 7 y 28 días, cumpliendo con el valor requerido de resistencia a compresión.

## 6.5 FISURAS EN LAS PROBETAS.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos para la resistencia a compresión en la tabla 58 se muestra un resumen de los tipos de fallas presentados para cada uno de los diseños en los cilindros fallados a 7 y 28 días. Teniendo en cuenta la figura 32 en la cual se muestra el esquema de cada uno de los tipos de fallas a compresión.

**Figura 32.** Tipos de fractura típicos a compresión



Fuente: NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, NTC 673. Tercera Actualización, p9.

**Tabla 60.** Tipos de fisuras

Diseño	Tipos de fisuras a compresión	
	7 días	28 días
Patrón	T3	T3
80% agr. Fino-20% vidrio molido	T3	T3
70% agr. Fino-30% vidrio molido	T5	T4
60% agr. Fino-40% vidrio molido	T5	T4

Fuente: Los autores

Fisuras verticales en ambos extremos del cilindro es la característica de las fracturas tipo T3, el tipo T4 presenta fractura diagonal sin fisuras en extremos y por último, las fisuras tipo 5 se caracterizan por tener fracturas en los lados superiores o inferiores. Este tipo de fallas se presentan debido a contracción del espécimen al momento de fraguar y fallar en el ensayo, también por el método de colocación de los cilindros en la máquina, por deficiencia de material en el interior del cilindro o por la mala acomodación del material al momento de fundir el espécimen.

## 6.6 MÓDULO DE ROTURA

En la tabla 61, se observan los módulos de rotura para cada mezcla teniendo en cuenta que son valores obtenidos a 7 días.

**Tabla 61.** Módulo de rotura para 7 días.

Diseño	VIGA 1				
	Dimensiones de la Viga			Carga máxima (P) Kg	Módulo de rotura (Kg/cm <sup>2</sup> )
	Ancho (b) cm	Alto (d) cm	Largo (l) cm		
Patrón	15.04	15.05	50.50	2291	30.94
80% agr. Fino-20% vidrio molido	15.22	15.34	50.60	2168	27.23
70% agr. Fino-30% vidrio molido	15.17	15.33	50.10	2194.0	27.69
60% agr. Fino-40% vidrio molido	15.16	15.22	50.10	2435	31.17
Diseño	VIGA 2				
	Dimensiones de la Viga			Carga máxima (P) Kg	Módulo de rotura (Kg/cm <sup>2</sup> )
	Ancho (b) cm	Alto (d) cm	Largo (l) cm		
Patrón	15.13	15.03	50.20	2261	29.75

**Tabla 61.** Continuación

Diseño	VIGA 2				
	Dimensiones de la Viga			Carga máxima (P) Kg	Módulo de rotura (Kg/cm <sup>2</sup> )
	Ancho (b) cm	Alto (d) cm	Largo (l) cm		
80% agr. Fino-20% vidrio molido	15.22	15.30	50.20	2140	27.02
70% agr. Fino-30% vidrio molido	15.21	12.28	50.30	2311	29.3
60% agr. Fino-40% vidrio molido	15.16	15.28	50.10	2545	32.37

Fuente: Los autores

En la tabla 62 se muestran los módulos de rotura obtenidos para 28 días (en esta edad ya se ha desarrollado en gran parte la mayor resistencia del diseño).

**Tabla 62.** Módulo de rotura para 28 días

Diseño	VIGA 1				
	Dimensiones de la Viga			Carga máxima (P) Kg	Módulo de rotura (Kg/cm <sup>2</sup> )
	Ancho (b) cm	Alto (d) cm	Largo (l) cm		
Patrón	15.08	15.06	50.40	3423	45
80% agr. Fino-20% vidrio molido	15.23	15.18	50.30	3636	46.59
70% agr. Fino-30% vidrio molido	15.13	15.13	50.10	3531	45.88
60% agr. Fino-40% vidrio molido	15.16	15.19	50.10	3194	41.06
Diseño	VIGA 2				
	Dimensiones de la Viga			Carga máxima (P) Kg	Módulo de rotura (Kg/cm <sup>2</sup> )
	Ancho (b) cm	Alto (d) cm	Largo (l) cm		
Patrón	15.11	15.12	50.40	3092	39.85
80% agr. Fino-20% vidrio molido	15.18	15.12	50.10	3132	40.6
70% agr. Fino-30% vidrio molido	15.14	15.18	50.30	3307	42.65
60% agr. Fino-40% vidrio molido	15.18	15.21	50.20	3341	42.83

Fuente: Los autores



En la tabla 63, se muestra el resumen de los módulos de rotura promedio expresados en Kg/cm<sup>2</sup> para 7 y 28 días.

**Tabla 63.**Módulo de Rotura

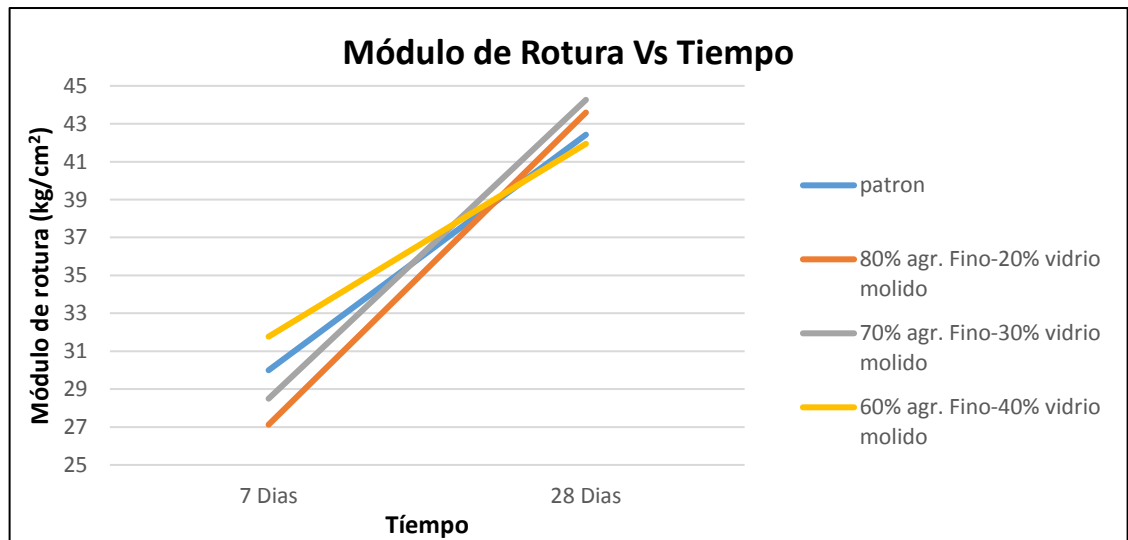
MÓDULO DE ROTURA		
DISEÑO	7 DÍAS	28 DÍAS
	MÓDULO DE ROTURA (Kg/cm <sup>2</sup> )	
PATRÓN	30	42
80% AGR. FINO-20% VIDRIO MOLIDO	27	44
70% AGR. FINO-30% VIDRIO MOLIDO	28.5	44.3
60% AGR. FINO-40% VIDRIO MOLIDO	32	42

Fuente: Los autores

Como se puede observar en la tabla 64, se muestran los valores del diseño patrón y cada uno de los diseños establecidos en los cuales el agregado grueso se mantiene constante con un valor de 50% escoria y 50% grava, pero variando el porcentaje de agregado fino no convencional (vidrio molido) en proporciones de 20, 30 y 40%.

Para representar mejor los datos obtenidos se realiza la figura 33.

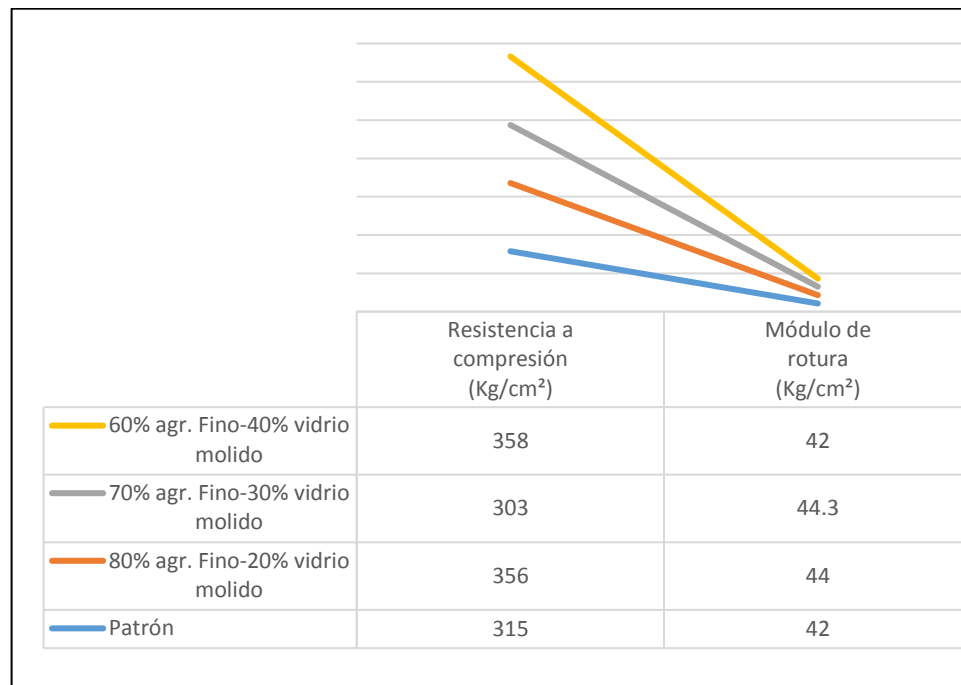
**Figura 33.** Módulo de Rotura Vs tiempo



Fuente: Los autores

Como se puede apreciar en la figura 33, los módulos de rotura obtenidos para cada diseño son ascendentes entre 7 y 28 días, teniendo en cuenta los valores de la resistencia a compresión mostrados anteriormente, se ratifica que a medida que aumenta la resistencia a compresión también lo hace la resistencia a flexión, tal afirmación se puede corroborar con la siguiente figura en la cual se muestran los valores de compresión y flexión obtenidos, teniendo en cuenta que estos valores son tomados a 28 días. También se ve que las mezclas del 30 y 40% de vidrio superan el módulo de rotura comparado con el diseño patrón.

**Figura 34.** Módulo de rotura y compresión del concreto



Fuente: Los autores

Como se observa en la figura 34, al comparar los valores de resistencia a compresión y flexión del concreto a 28 días, se corrobora que es directamente proporcional el aumento de los dos, ya que al aumentar el valor a compresión también lo hace el valor de flexión, pero en menor proporción.

Al realizar una comparación con la especificación de INVIAS teniendo en cuenta los criterios de diseño para la mezcla de concreto en pavimentos de concreto hidráulico para un tránsito de NT1, la resistencia mínima a flexotracción a veintiocho días es 3.8 MPa tal como se observa en la figura 35.

**Figura 35.** Criterios de diseño para la mezcla de concreto en pavimentos de concreto hidráulico.

Tabla 500 - 6. Criterios de diseño para la mezcla de concreto en pavimentos de concreto hidráulico

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Resistencia a la flexotracción a veintiocho (28) días, mínimo (MPa): - Tránsito NT1 - Tránsito NT2 - Tránsito NT3 (Nota 1)	E-414	3.8 4.0 4.2
Contenido de cemento en masa por m <sup>3</sup> de concreto, mínimo ( kg) - Concreto de fraguado normal - Concreto de fraguado rápido (técnica fast-track)	-	300 350
Relación agua / material cementante, máximo - Concreto de fraguado normal - Concreto de fraguado rápido (técnica fast-track)	-	0.48 0.45
Asentamiento ( mm): - Formaleta fija - Formaleta deslizante	E-404	25 a 50 13 a 38

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS.INVIAS. Especificaciones Generales de Construcción de carreteras. Artículo 500. 2013 tabla 500 – 6.

Ya que los pavimentos trabajan principalmente a flexión, esta resistencia es un parámetro de gran importancia y para tener en cuenta en el diseño, por ello se definió que la mezcla con la cual se podría trabajar un pavimento rígido es la conformada por un 50% de Grava- 50% EASF y 70% arena - 30% vidrio molido reciclado, ya que esta mezcla fue la que obtuvo un valor de compresión que aumentaba proporcionalmente con el de flexión (valor que fue mayor comparado con las demás mezclas), cumpliendo también con la especificación en la cual el valor mínimo de flexión para un tránsito NT1 es 3.8 MPa, ya que para el diseño escogido el valor fue 4.34 MPa. Comparándola con las demás dosificaciones se tiene la tabla 62.

**Tabla 64.**Cuadro resumen de valores a flexión comparados con la norma INVIAS

Resistencia a Flexión		
	Kg/cm <sup>2</sup>	MPa
Requisito INIVAS	38.8	3.80
80% agr. Fino-20% vidrio molido	44.0	4.31
70% agr. Fino-30% vidrio molido	44.3	4.34
60% agr. Fino-40% vidrio molido	42.0	4.12

Fuente: Los autores

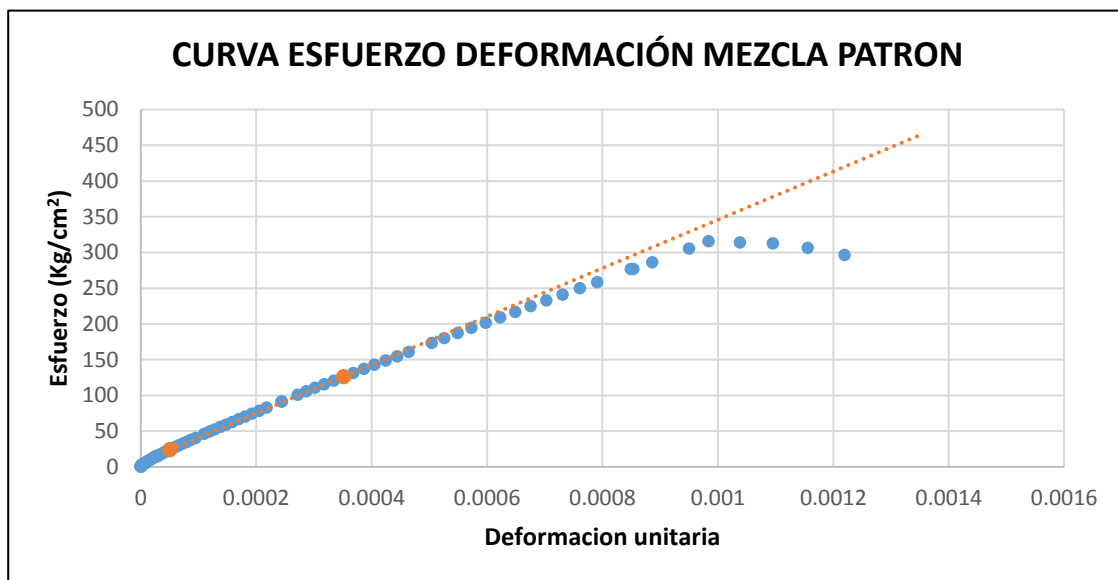
Como se puede ver en la tabla anterior todas las mezclas cumplen con la resistencia a flexión mínima a veintiocho días, para un tránsito de NT1, según lo especifica INVIAS.

## 6.7 MÓDULO DE ELASTICIDAD

La determinación y cálculo del módulo de elasticidad se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita en la norma INVE-424 y la NTC 4025, el cálculo de este módulo se realiza a partir de la curva esfuerzo-deformación obtenida del ensayo (Módulo de elasticidad estático y relación de poisson del concreto en compresión).

En las figuras 36 y 37 se presentan los resultados obtenidos de módulo de elasticidad para la mezcla patrón y para la mezcla con el mejor desempeño a la flexión correspondiente a 70% arena, 30% polvo de vidrio, 50% grava y 50% EAFS.

**Figura 36.** Curva esfuerzo deformación mezcla patrón



Fuente: Los autores

Para el cálculo del módulo de elasticidad se hace uso de la ecuación 2.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.000050}$$

Donde:

E=Módulo de elasticidad, MPa.

$S_2$  = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última, Mpa.

$S_1$  = Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal  $\epsilon_1$ , de 50 millonésimas, MPa.

$\epsilon_2$  = Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo  $S_2$ .

A partir de la curva esfuerzo deformación presentada en la figura 36 se obtuvieron los resultados de cada una de las variables para la determinación del módulo de elasticidad.

Los resultados obtenidos son:

$S_2$ : 126.217 Kg/cm<sup>2</sup>

$S_1$ : 24.279 Kg/cm<sup>2</sup>

$\epsilon_2$ : 0.000351275

Remplazando estos valores en la ecuación 2 se tiene:

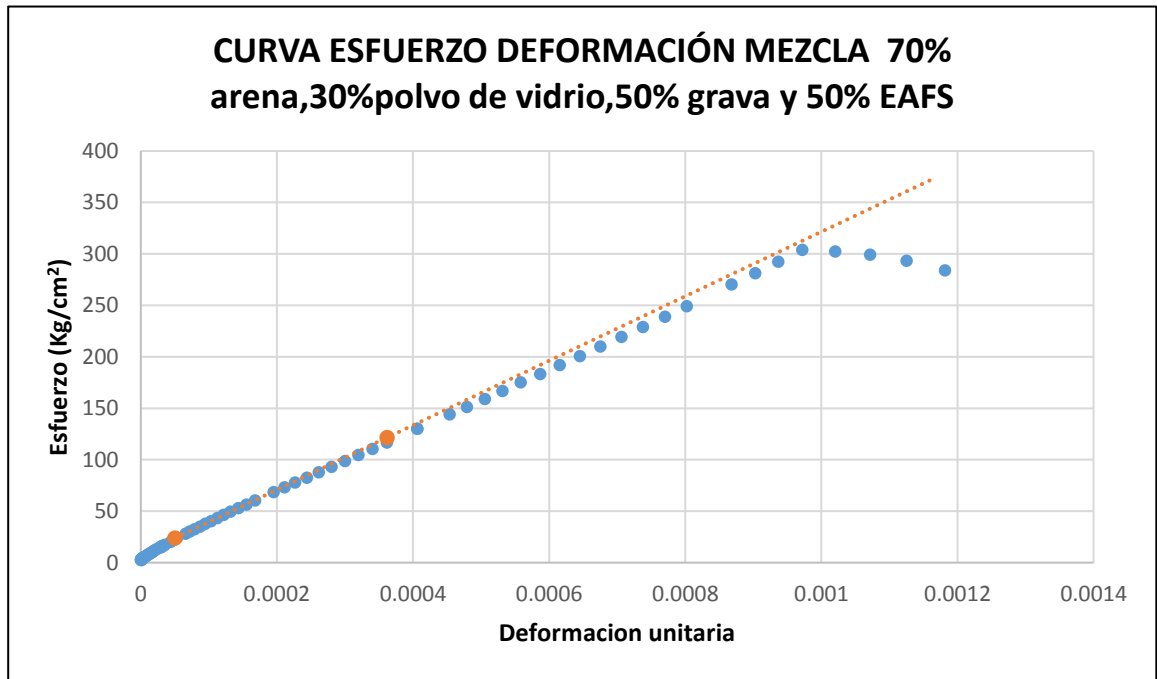
$$E = \frac{126.217 \text{ Kg/cm}^2 - 24.279 \text{ Kg/cm}^2}{0.000351275 - 0.000050}$$

$$E = 338353.37 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 33835.37 \text{ MPa}$$

Determinado el módulo de elasticidad para la mezcla patrón, se presenta a continuación el mismo procedimiento de cálculo de la mezcla que presentó el mejor desempeño a flexión, la cual correspondió a la dosificación 70% arena, 30% polvo de vidrio, 50% grava y 50% EAFS.

**Figura 37.** Curva esfuerzo deformación mezcla 70% arena, 30% polvo de vidrio, 50% grava y 50% EAFS.



Fuente: Los autores

A partir de la curva esfuerzo deformación presentada en la figura 37 se obtuvieron los resultados de cada una de las variables para la determinación del módulo de elasticidad.

Los resultados obtenidos son:

$$S_2: 121.470 \text{ Kg/cm}^2$$

$$S_1: 23.818 \text{ Kg/cm}^2$$

$$\epsilon_2: 0.000361623$$

Remplazando estos valores en la ecuación 2 se tiene:

$$E = \frac{121.470 \text{ Kg/cm}^2 - 23.818 \text{ Kg/cm}^2}{0.000361623 - 0.000050}$$

$$E = 313367.89 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E = 31336.78 \text{ MPa}$$

Con los resultados del módulo de elasticidad a partir de la curva esfuerzo deformación se obtuvo un módulo de elasticidad para la mezcla 70% arena, 30% polvo de vidrio, 50% grava y 50% EAFS bajo en comparación con el módulo de elasticidad obtenido para la mezcla patrón; esto indica que esta mezcla tuvo una mayor deformación con la aplicación de una menor carga lo que permite estimar que es un material un 7.39 % más elástico que la muestra patrón.

## **6.8 CARTAS DE DISEÑO**

Para la realización de cartas de diseño se requieren un elevado número de observaciones para establecer relaciones aceptables entre las variables y los resultados de las pruebas que correlaciona el comportamiento de los pavimentos in situ, a través de observaciones y mediciones de campo, con los actores que causan los mecanismos de degradación en las estructuras.

Los factores más importantes son las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones medioambientales a las cuales se encuentra sometida la estructura, el tipo de suelo, terreno de subrasante, la calidad de los materiales empleados y deficiencias durante el proceso constructivo.

A partir de lo anterior no fue posible cumplir con el último objetivo específico propuesto dentro de nuestro proyecto, esto debido a que no se contó con los requerimientos mencionados anteriormente ya que los resultados y análisis obtenidos de la experimentación no son suficientes para poder diseñar cartas de diseño para pavimento rígido, además para esto se deberían hacer una mayor cantidad de ensayos que no contemplamos dentro de nuestra investigación.

## 7. CONCLUSIONES

Al analizar el comportamiento de las mezclas realizadas, se pudo concluir que el uso de EAFS y polvo de vidrio reciclado (PVR) permite el aumento de la resistencia en comparación con un concreto convencional, siendo la combinación 60% arena, 40% polvo de vidrio, 50% grava y 50% EAFS la que presentó un mejor comportamiento a la compresión y la combinación 70% arena, 30% polvo de vidrio, 50% arena y 50% EAFS la que presentó el mejor comportamiento a flexión.

Los materiales utilizados en esta investigación, escoria de horno de arco eléctrico EAFS y polvo de vidrio molido reciclado, se ajustaron y cumplieron todas las normas y especificaciones establecidas por la norma INVIAS 2013, salvo la granulometría de la EAFS y del polvo de vidrio, para estos dos materiales fue necesario realizar un proceso de ajuste de granulometría para cumplir con los requisitos establecidos.

Al procesar el vidrio reciclado de botellas previamente desinfectadas mediante una máquina trituradora en este caso la máquina de los ángeles, se obtuvo un material cuya curva granulométrica no se ajustó a las franjas granulométricas definidas por las especificaciones INVIAS, por tanto, fue necesario ajustar la granulometría del polvo de vidrio reciclado (PVR), mediante un proceso de tamizado que garantizara que se obtuviera una granulometría igual a la de la arena empleada en esta investigación, de esta manera la nueva granulometría del PVR cumplió con las especificaciones INVIAS 2013.

Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de las mezclas, avalando su uso en la conformación de mezclas de concreto hidráulico, siguiendo la normatividad INVIAS vigente. Además, se comprueba que es viable el uso de materiales producidos a nivel regional, para el desarrollo de obras civiles.

Durante la elaboración del concreto con los diferentes porcentajes de vidrio añadidos en reemplazo de la arena, se visualizó que, al incrementar el porcentaje de vidrio, la trabajabilidad mejora ya que a mayor porcentaje de polvo de vidrio el Slump aumentó, esto pudo ser debido a que al reemplazar la arena que es capaz de absorber el agua por un material cuya absorción es nula, es mayor la cantidad de agua libre en la mezcla, esto la hace más fluida.

Analizando el resultado obtenido de módulo de finura del agregado fino y teniendo presente que dentro de la Especificación del INVIAS se recomienda que los módulos de finura del agregado se encuentren entre un intervalo de 2.3 a 3.1, se concluye que el agregado fino utilizado en el presente trabajo cumplió este requisito dado que el valor obtenido fue de 2.41.

La consistencia no presenta una variación significativa, sin embargo, se produce un ligero aumento del asentamiento conforme incrementa el contenido de vidrio, esto



debido al agua no absorbida por el polvo de vidrio. En todas las mezclas se obtuvieron asentamientos dentro del rango establecido por las especificaciones de construcción de carreteras para pavimentos en concreto (25 mm a 50 mm).

Los resultados obtenidos a 7 días en el caso de resistencia a compresión fueron consistentes, debido a que a medida que aumentaba el porcentaje de vidrio adicionado aumentaba el valor de la resistencia, pero caso contrario ocurrió en los cilindros fallados a 28 días, ya que el valor de resistencia para la muestra con 30 % de polvo de vidrio fue menor que el de 20 o 40 %. En conclusión, para las mezclas realizadas, el valor que superó la resistencia del diseño esperada correspondió a la mezcla que posee un 50% EAFS, 50% grava, 60% de arena y 40% polvo de vidrio reciclado.

Los valores obtenidos para la resistencia a la flexión de las mezclas realizadas, indican que el valor que superó al diseño patrón fue la mezcla compuesta por una adición de vidrio del 30%, como lo muestra la figura 35. Otra tendencia que se observó fue que los mayores valores en las fallas a 7 días demostraron ser los más viables para obtener el valor máximo ya sea de flexión o resistencia a compresión, pero al realizar la falla a los 28 días cambiaron los resultados esperados, lo que llevó a concluir que las mezclas se comportaron de una manera muy diferente conforme pasa el tiempo de curado.

Como se puede observar en los resultados obtenidos para el esfuerzo flexionante de las vigas falladas para cada diseño a los 7 y 28 días se puede apreciar que a medida que pasa el tiempo la resistencia de la mezcla aumenta por ende las cargas aplicadas a 28 días son mayores que las utilizadas a 7 días. El diseño adicionado con 30% de vidrio tuvo un momento flector mayor con relación al diseño patrón y las mezclas adicionadas con 20 y 40 % de vidrio.

La utilización de escoria negra de horno de arco eléctrico (EAFS) y polvo de vidrio reciclado (PVR), trae consigo grandes beneficios, como la utilización de botellas de vidrio y de los residuos de procesos de obtención del acero. Por otra parte, la utilización de vidrio en la fabricación de concreto, también trae consigo grandes beneficios al medio ambiente ya que se utiliza vidrio reciclado, el cual después de lavado y tamizado está listo para su uso.

Con los resultados obtenidos del módulo de elasticidad a partir de la curva esfuerzo deformación, se obtuvo un módulo de elasticidad bajo (para la mezcla 70% arena, 30% polvo de vidrio, 50% grava y 50% EAFS) en comparación con el módulo de elasticidad obtenido para la mezcla patrón, esto nos indica que esta mezcla tuvo una mayor deformación con la aplicación de una menor carga, lo que permite estimar que es un material que presenta un 7.39 % más elástico con relación a la muestra patrón.

Según David Vargas Castro en su investigación “Reutilización del vidrio como agregado fino en la elaboración de morteros de cemento y concretos”, el incremento de resistencia se da con la edad debido a que al usar el vidrio molido este sigue el mismo fenómeno físico de endurecimiento que el cemento, sus partículas se hidratan progresivamente, inicialmente de manera superficial, y desde ahí el endurecimiento continúa hasta llegar al núcleo de las partículas. Esto pudo ser la causa por la cual se obtuvieron mejores resistencias con la sustitución de arena por porcentajes de polvo de vidrio.

El módulo de rotura o máxima resistencia a flexión, es un ensayo de vital importancia al momento de realizar diseños para un pavimento rígido, ya que este trabaja principalmente a flexión. Por ello el diseño con adición de 30% de vidrio y 50% de EASF, fue el que tuvo mayor valor de resistencia a la flexión y cumplió con la especificación al tener un valor de 4.3 MPa, sabiendo que la norma para tránsito de NT1 exige un valor mínimo de 3.8 MPa.

Por último, se observó que al realizar un concreto con la utilización de estos agregados no convencionales se generan costos adicionales, al tener que realizar un proceso adicional antes de ser utilizados, lo que demanda mayor mano de obra y tiempo, ya que en esta investigación todo ese proceso se hizo de forma manual.

## 8. RECOMENDACIONES

Para el desarrollo de futuros trabajos de investigación referentes a este tema, se recomienda emplear diferentes porcentajes a los trabajados en el desarrollo del presente proyecto, sin exceder los rangos establecidos en el mismo. Esto con el fin de obtener resultados más precisos para la implementación de esta tecnología en el concreto.

Al realizar investigaciones de este tipo es aconsejable diseñar concretos para diferentes resistencias, con el fin conocer el comportamiento del polvo de vidrio (PVR) y la EAFS en el concreto bajo diferentes condiciones y sollicitaciones de carga.

Se recomienda realizar un trabajo de laboratorio muy cuidadoso y preciso, ya que se pueden presentar errores en la toma de información o en la ejecución de algunos ensayos, lo que puede generar la alteración de los resultados.

Es recomendable hacer un trabajo de campo en el cual se implemente el uso real de escoria negra de horno de arco eléctrico EAFS como agregado grueso en pavimentos rígidos, de esta manera se podrá verificar su comportamiento en las condiciones reales de una vía.

Se recomienda continuar con la investigación de las aplicaciones a la ingeniería de la escoria negra de horno de arco eléctrico EAFS, específicamente en áreas como el diseño de pavimentos en concreto, y no solamente como agregado para un concreto rígido sino como agregado para bases, subbases y edificaciones, analizando el comportamiento de su expansión volumétrica y su viabilidad en la utilización en la construcción de carreteras de la región, entre otras variables; igualmente continuar investigando el uso de residuos industriales en mezclas de concreto o en otros procesos constructivos, para reducir el daño que dichos residuos le hacen al medio ambiente.

Se deben evaluar otros aspectos importantes de la construcción en los que la utilización del vidrio como parte de la mezcla puede llegar a tener algún efecto, por ejemplo, la afectación a largo plazo a otros materiales utilizados en la construcción como el acero de refuerzo. Además, es necesario evaluar otras características de los concretos como las que mencionan Kostmaka et al (2004): “Resistencias a la tensión, a la flexión, a la torsión y el módulo de elasticidad”.

Establecer el sistema más apropiado durante el proceso de molienda del vidrio y preparación de las probetas, considerando siempre el uso de equipo de protección personal como guantes, mascarilla y gafas, para evitar aspirar el polvo proveniente del triturado el mismo, ya que es altamente nocivo para la salud.

Obtener los especímenes de concreto siguiendo lo establecido en las normas para conseguir mejores resultados evitando porosidad, acumulación de aire y deficiencia al enrasar, esta última provoca una concentración de carga no uniforme durante el ensayo de compresión.

Por otra parte, sería importante tomar en cuenta que existen estudios realizados a la fecha en los cuales el vidrio molido sustituye parcialmente al cemento y no a la arena, esta nueva sustitución puede traer mayores beneficios en la parte técnica y económica si resulta ser factible, por lo que se podría tomar en cuenta para futuros estudios.

El estudio ejecutado analiza la resistencia a compresión y a flexión del hormigón al adicionar vidrio molido en reemplazo de la arena hasta en un 40%, es recomendable continuar con estudios en el tema con el motivo de conocer la influencia que pueda tener en la resistencia la adición de porcentajes mayores.

En cuanto al módulo de elasticidad se recomienda revisar en futuras investigaciones su porosidad para verificar la influencia de esta en su deformación y de esta manera poder precisar y verificar el comportamiento ante sollicitaciones de carga mayores.

El alcance del presente trabajo de investigación no abarca el análisis económico ni ambiental, sin embargo, se exhorta a futuros investigadores a realizar un estudio detallado de los impactos económicos y ambientales producidos por mezclas en concreto con materiales no convencionales.

Se recomiendan realizar estudios de factibilidad económica para utilizar estos materiales no convencionales en la elaboración mezclas de concreto, ya que, por ejemplo, al tener que realizarle un proceso estos agregados a la granulometría que solicita las especificaciones genera un costo adicional en la mezcla.

Se recomienda implementar EAFS y polvo de vidrio molido (PVR), a mezclas de concreto en sustitución parcial del agregado grueso y fino respectivamente, ya que, logran alcanzar las resistencias especificadas. Además, con la utilización de estos residuos se puede mitigar el impacto ambiental, producido por los desechos de escoria de acería y vidrio, dándole uso en obras civiles y viales; por último, es necesario investigar con más detalle el comportamiento de las mezclas con estos materiales a largo plazo, evaluando otras propiedades y sustituciones en porcentaje de agregado.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

GARCÉS, Juan. FLORES de la Rosa Vanessa. HUAMÁN, Freddy. Estudio del polvo de vidrio obtenido de la molienda de botellas recicladas como sustituto parcial del cemento en el hormigón. Ecuador, La libertad, 2016.

CASTILLO PAZMIÑO, Marcel. Investigación de la utilización del vidrio molido como material de construcción y técnicas constructivas 2010.

TEJADA ROMERO, Guillermo. Efecto en la resistencia a la compresión al reemplazar porcentualmente cemento por vidrio molido las mezclas de hormigón.2014.

POVEDA, Ricardo. Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A. Ecuador.Quito.2015

PEÑAFIEL, Daniela. Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino. Ecuador.Ambato.2016.

PARRA ARAQUE, Lina María. SÁNCHEZ GARCÍA, Diana Pilar. Análisis de la valorización de escorias negras como material agregado para concreto en el marco de la gestión ambiental de la siderúrgica Diaco. Municipio de Tuta Boyacá. Bogotá: Universidad De La Salle. Departamento de ingeniería Civil, 2010. 118p.

NICOLA, Sara. Utilización de escorias y polvos de acería en la producción de bloques y adoquines. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

AMARAL DE LIMA, Luciana. Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de ingeniería de la construcción. 2009.

GIRALDO BOLÍVAR, Orlando. Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón. Universidad Nacional de Medellín.1987.

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá 2002.

SANDINO PARDO, Alejandro. Materiales para estructuras. Bogotá D.C.2002.

SEQUEIRA, J. E. (1976) Temas sobre materiales de construcción. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.

RIVERA,Jorge.A.Tecnologia del Concreto.UNICAUCA.125p.

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Título C.8.5.4

GONZÁLEZ CUEVAS, Óscar. Aspectos fundamentales del concreto reforzado. Cuarta edición. México: Editorial Limusa.2005.

PÉREZ ROJAS, Yazmín Andrea. Desempeño de adiciones en concretos con EAFS y protección del acero de refuerzo. Tesis Doctoral .Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja .2017.

PUERTAS, F. Escorias de horno de arco eléctrico: composición y comportamiento hidráulico. ICCET/CSIC. España. 1993.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. INVIAS. Especificaciones Generales de Construcción de carreteras. Normas de ensayos de carreteras. Sección 200.Agregados Pétreos.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. INVIAS. Especificaciones Generales de Construcción de carreteras. Normas de ensayos de carreteras. Sección 400.Concreto Hidráulico.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS.INVIAS. Especificaciones Generales de Construcción de carreteras. Capítulo 5.Pavimentos de Concreto. Artículos 500 y 505.

RAMÍREZ, Oscar. Geotecnia básica: Apuntes de clase. Segunda edición Tunja. Grupo de imprenta y publicaciones UPTC, ISBN: 660-062-9.

ÁVILA CEPEDA, Carlos Alberto. GARCÍA CRISTNACHO, Milton. Incidencia del reemplazo de agregados por fragmentos de llantas en la resistencia del concreto. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.CEDEC.2009.

## **ANEXOS**

Se anexa CD, con formatos de laboratorio de suelos y pavimentos para la caracterización de material convencional y no convencional.